Isaac Asimov.
IL LIBRO DI FISICA.

Titolo originale: "Asimov's New Guide to Science".
Traduzione di: Carla Sborgi.
Copyright 1984 by Basic Books, Inc.
Copyright 1986 Arnoldo Mondadori Editore S.p.A.

NOTA SULL'AUTORE:

ISAAC ASIMOV, nato in Russia nel 1912, è il più celebre narratore americano di fantascienza, oltre che affermato biologo e docente di biochimica all'Istituto Medico della Boston University. Tra le sue opere ricordiamo: "Neanche gli Dei", "Il collasso dell'universo", "Civiltà extraterrestri", "Passato e futuro", "Catastrofi a scelta", "Le grandi storie della fantascienza", "Esplorando la terra e il cosmo", "Le parole della scienza", "Il vagabondo delle scienze", "Fondazione", "Tutti i miei robot".

SOMMARIO.

PRIMO VOLUME.

Prefazione

Capitolo 1. COSA È LA SCIENZA?
Il desiderio di sapere; I greci; La geometria e la matematica; Il processo deduttivo; Il Rinascimento e Copernico; Sperimentazione e induzione; La scienza moderna.

Capitolo 2. L'UNIVERSO:
Dimensioni dell'universo; Le prime misurazioni: - Misurazione del sistema solare - Le stelle più lontane - Misurazione della luminosità di una stella - Determinazione delle dimensioni della galassia - L'universo si ingrandisce - Galassie a spirale - Ammassi di galassie; La nascita dell'universo: L'età della terra - Il sole e il sistema solare - Il big bang; La morte del sole: Novae e supernovae - L'evoluzione delle stelle; Le finestre sull'universo: Il telescopio - Lo spettroscopio - La fotografia - La radioastronomia - Al di là della nostra galassia; I nuovi oggetti: Le quasar - Le stelle di neutroni - I buchi neri - Lo spazio «vuoto».

Capitolo 3. IL SISTEMA SOLARE:
Nascita del sistema solare; Il sole; La luna: Misure relative alla luna - Viaggi verso la luna - I razzi - Esplorazione della luna - Gli astronauti e la luna; Venere e Mercurio: Misure relative ai pianeti - L'esplorazione di Venere per mezzo di sonde - L'esplorazione di Mercurio per mezzo di sonde; Marte: Mappe di Marte - L'esplorazione di Marte per mezzo di sonde - I satelliti di Marte; Giove: I satelliti di Giove - Forma e superficie di Giove - La composizione di Giove - L'esplorazione di Giove per mezzo di sonde; Saturno: Gli anelli di Saturno - I satelliti di Saturno; I pianeti più esterni: Urano - Nettuno - Plutone; Gli asteroidi: Asteroidi al di là dell'orbita di Marte - «Earth grazers» e oggetti Apollo; Le comete.

VISIT…



Capitolo 4. LA TERRA:

Forma e dimensioni: La terra è una sfera - Misurazioni del geoide - Il peso della terra; Struttura della terra: I terremoti - I vulcani - Formazione della crosta terrestre - Il nucleo liquido - Il mantello terrestre - L'origine della luna - La terra è stata liquida?; L'oceano: Le correnti - Le risorse dell'oceano - I fondali oceanici e le trasformazioni dei continenti - La vita negli abissi marini - Immersioni a grande profondità; Le calotte polari: Il polo nord - Il polo sud - L'Antartide - L'Anno Geofisico Internazionale - I ghiacciai - Cause delle glaciazioni.

Capitolo 5. L'ATMOSFERA

Capitolo 6. GLI ELEMENTI

La tavola periodica: Le prime teorie - La teoria atomica - La tavola periodica di Mendeleev - I numeri atomici; Gli elementi radioattivi: Identificazione degli elementi - Alla ricerca degli elementi mancanti - Elementi transuranici - Elementi superpesanti; Gli elettroni: La periodicità della tavola periodica - I gas nobili, o inerti - Gli elementi della serie delle terre rare - Gli elementi di transizione - Gli attinidi; I gas: Liquefazione - Il carburante per i razzi - Superconduttori e superfluidi - Criogenia - Alte pressioni; I metalli: Ferro e acciaio - I nuovi metalli.

SECONDO VOLUME

Capitolo 7. LE PARTICELLE.

L'atomo nucleare: Identificazione delle particelle - Il nucleo dell'atomo; Isotopi: Mattoni uniformi - Sulle tracce delle particelle - La trasmutazione degli elementi; Nuove particelle: Il neutrone - Il positrone - Elementi radioattivi - Acceleratori di particelle - Lo spin delle particelle - I raggi cosmici - La struttura del nucleo; I leptoni: Neutrini e antineutrini - La caccia al neutrino - L'interazione nucleare - Il muone - Il tauone - La massa del neutrino; Adroni e quark: Pioni e mesoni - Barioni - La teoria dei quark; I campi: L'interazione elettromagnetica - Le leggi di conservazione - Una teoria unitaria dei campi.

Capitolo 8. LE ONDE.

La luce: La natura della luce - La velocità della luce - Il radar - La propagazione delle onde luminose attraverso lo spazio - I monopoli magnetici - Moto assoluto; Relatività: Le equazioni di Lorentz- FitzGerald - La radiazione e la teoria dei quanti di Planck - Einstein e il dualismo onda-particella - La teoria della relatività - Lo spazio-tempo e il paradosso degli orologi - La gravità e la teoria della relatività generale di Einstein - Verifiche della teoria della relatività generale; II calore: Misurazione della temperatura - Due teorie del calore - Il calore come energia - Il calore e il moto molecolare; Massa ed energia; Onde e particelle: Microscopia elettronica - Gli elettroni come onde - Il principio di indeterminazione.

Capitolo 9. LA MACCHINA.

Fuoco e vapore: Tecnologia primitiva - La macchina a vapore; L'elettricità: Elettricità statica - Elettricità dinamica - Produzione dell'elettricità - Prime applicazioni tecnologiche dell'elettricità; Tecnologia elettrica: Il telefono - Registrazione del suono - La luce artificiale prima dell'elettricità - La luce elettrica - Fotografia; Motori a combustione interna: L'automobile - L'aeroplano; Elettronica: La radio - La televisione - Il transistor; Maser e laser: I maser - I laser.

Capitolo 10. IL REATTORE.

L'energia: Carbone e petrolio: combustibili fossili - Energia solare; Uso bellico del nucleo: La scoperta della fissione - La reazione a catena - La prima pila atomica - L'Era nucleare - La reazione termonucleare; Uso pacifico del nucleo: Navi a propulsione nucleare - Reattori nucleari per la produzione di elettricità - Reattori autofertilizzanti - I pericoli della radiazione - Utilizzo dei prodotti di fissione - Ricaduta radioattiva; Fusione nucleare controllata.

BIBLIOGRAFIA.

IL LIBRO DI FISICA.

A Janet Jeppson Asimov
che divide con me
gli interessi scientifici
e tutti gli altri aspetti della mia vita

PREFAZIONE.

Il rapido progresso della scienza suscita l'interesse e l'entusiasmo di tutti coloro che sono sensibili al fascino delle indomabili possibilità dello spirito umano e ai continui successi mietuti dal metodo scientifico quale strumento per penetrare le complessità dell'universo.

Ma qual è la situazione di una persona che voglia essere continuamente aggiornata su tutte le fasi del progresso scientifico, con lo scopo deliberato di farsene portavoce presso il vasto pubblico? Per tale persona, interesse ed entusiasmo sono temperati da una sorta di disperazione.

La scienza non è mai ferma: essa è come un panorama che si dissolve impercettibilmente e si trasforma sotto i nostri occhi. Non è possibile in un momento qualsiasi coglierla in tutti i suoi particolari senza trovarsi immediatamente superati.

Nel 1960 veniva pubblicata "The Intelligent Man's Guide to Science", e immediatamente essa era superata dal progredire della scienza; pertanto nel 1965 usciva "The New Intelligent Man's Guide to Science", per poter prendere in considerazione, per esempio, le quasar e i laser (non ancora noti nel 1960, eppure già diventati termini familiari un paio di anni dopo).

Ma la scienza proseguiva inesorabilmente: dopo il 1965 con argomenti nuovi, come le pulsar, i buchi neri, la deriva dei continenti, gli uomini sulla luna, il sonno REM, le onde gravitazionali, l'olografia, l'AMP ciclico e così via.

Era dunque tempo di procedere a un'altra edizione, la terza. Ma come dovevamo chiamarla? Evidentemente non: "The New New Intelligent Man's Guide to Science"; perciò l'abbiamo chiamata, semplicemente, "Asimov's Guide to Science"; essa è stata pubblicata nel 1972.

Ma la scienza si è rifiutata ancora una volta di arrestarsi. Ormai, grazie alle nostre sonde spaziali, se ne sapeva abbastanza sul sistema solare da rendere necessario un apposito capitolo. E ora abbiamo le nuove teorie sull'universo inflazionario, sulla fine dei dinosauri, sui quark, sui gluoni, come pure le teorie unitarie dei campi e quelle dei monopòli magnetici; per non parlare della crisi energetica, degli home computer, dei robot, dell'evoluzione punteggiata, degli oncogeni e di una quantità di altre cose.

Era dunque tempo di procedere a un'altra edizione, la quarta; e dato che ho cambiato titolo a ogni nuova edizione, così farò anche questa volta: ecco dunque "Asimov's New Guide to Science".

New York, 1984
Isaac Asimov.

Capitolo 1.
COSA È LA SCIENZA?

All'inizio, si può dire, c'era la curiosità.

La curiosità, l'intenso desiderio di sapere, non compare nella materia morta, e sembra non essere caratteristica neppure di certe forme di organismi viventi, che, proprio per tale ragione, a gran fatica riusciamo a considerare come viventi.

Un albero non mostra curiosità per il suo ambiente, almeno in modo per noi riconoscibile; lo stesso vale per una spugna o un'ostrica: il vento, la pioggia, le correnti dell'oceano apportano loro ciò di cui abbisognano, ed essi ne traggono quello che possono. Se il caso fa sì che ciò che giunge a loro siano il fuoco, un veleno, dei predatori o dei parassiti, essi muoiono stoicamente e tacitamente come sono vissuti.

Tuttavia fin dai primi stadi dell'evolversi della vita alcuni organismi svilupparono un moto indipendente; ciò costituì per loro un progresso enorme dal punto di vista del controllo dell'ambiente. Un organismo capace di muoversi non doveva più aspettare in passiva immobilità che il cibo giungesse fino a lui, ma andava alla sua ricerca.

Così l'avventura entrò nel mondo - e con essa la curiosità.

L'individuo che esitava nella caccia competitiva per il cibo, che svolgeva le sue indagini in modo eccessivamente abitudinario, moriva di fame. Assai presto la curiosità per l'ambiente fu imposta come condizione per la sopravvivenza.

Il paramecio unicellulare che si aggira qua e là in una ricerca casuale non può avere delle volizioni e dei desideri nello stesso senso in cui li abbiamo noi, ma possiede un impulso, magari soltanto di natura fisico-chimica, che lo spinge a comportarsi come se stesse esplorando il proprio ambiente in cerca di cibo o di sicurezza, o di entrambi. E questo «atto di curiosità» è quello che noi più facilmente riconosciamo come qualcosa di inseparabile dal genere di vita più affine alla nostra.

Via via che gli organismi divennero più complicati, i loro organi di senso si moltiplicarono, diventando sia più complessi, sia più sensibili. Dall'ambiente esterno vennero ricevuti più numerosi e più diversificati messaggi, che informavano sull'ambiente stesso. Al contempo si sviluppò (non sappiamo se come causa o come effetto) una complessità sempre maggiore del sistema nervoso, lo strumento vivente che interpreta e immagazzina i dati raccolti dagli organi di senso.

IL DESIDERIO DI SAPERE.

A un certo momento la capacità di ricevere, immagazzinare e interpretare i messaggi provenienti dal mondo esterno può andare oltre la pura e semplice necessità. Un organismo può trovarsi in uno stato di sazietà, e può darsi che, sul momento, non vi siano pericoli in vista. Cosa fa a questo punto?

Può cadere in uno stato di torpore come quello dell'ostrica. Ma almeno gli organismi superiori mostrano un forte istinto a esplorare l'ambiente. La potremmo definire una curiosità oziosa; anche se possiamo sorriderne, è sulla sua base che valutiamo l'intelligenza. Il cane, nei momenti di ozio, annusa pigramente a destra e a sinistra, drizzando le orecchie a certi suoni che noi non siamo in grado di udire; ed è per questo che lo giudichiamo più intelligente del gatto, che nei momenti di ozio si liscia il pelo o si stira voluttuosamente e pigramente e si addormenta. Più il cervello è progredito, maggiore è l'impulso a esplorare, maggiore il «sovrappiù di curiosità». La scimmia è proverbiale per la sua curiosità. Il suo piccolo cervello affaccendato non può fare a meno di interessarsi a tutto ciò che è alla sua portata; e sotto questo aspetto, come sotto molti altri, l'uomo non è che una superscimmia.

Il cervello umano è il pezzo di materia organizzato nel modo più meraviglioso di tutto l'universo conosciuto; la sua capacità di ricevere, organizzare e immagazzinare dati supera enormemente le necessità ordinarie della vita. È stato calcolato che, nel corso di una vita, l'essere umano è in grado di apprendere fino a 15 trilioni di informazioni elementari.

È a questa possibilità in più che dobbiamo la nostra suscettibilità a essere afflitti da una malattia estremamente penosa, la noia. Un essere umano che sia obbligato a vivere in una situazione in cui non ha l'opportunità di utilizzare il proprio cervello salvo che per una sopravvivenza a livello minimo, proverà gradualmente una varietà di sintomi spiacevoli, che possono raggiungere una seria disorganizzazione mentale. Il fatto è che l'essere umano normale ha una curiosità intensa e insopprimibile; se una persona non ha l'opportunità di soddisfarla in un modo immediatamente utile, la soddisferà diversamente - magari in un modo indesiderabile o biasimevole che può attirarsi commenti come l'invito a «badare ai fatti propri».

Le grandi potenzialità della curiosità umana, pur comportando il pericolo di una punizione, sono riflesse nei miti e nelle leggende della razza umana. I greci crearono il mito del vaso di Pandora: a Pandora, la prima donna, venne donato un vaso con la proibizione di aprirlo, ma lei si affrettò a scoperchiarlo (reazione abbastanza naturale) e lo trovò pieno degli spiriti della malattia, della carestia, dell'odio e di tutti i mali possibili - che sfuggirono dal vaso, e da allora hanno afflitto l'intero mondo.

Nel racconto biblico della tentazione di Eva appare evidente (per lo meno a me) che il compito del serpente era il più facile del mondo, e che avrebbe potuto risparmiarsi la fatica di parlare: la curiosità avrebbe comunque spinto Eva ad assaggiare il frutto proibito, anche senza che qualcuno la tentasse dall'esterno. Se la vostra mentalità tende a dare un'interpretazione allegorica della Bibbia, potete concepire il serpente come la semplice rappresentazione di questa pulsione interiore. Nella raffigurazione tradizionale di Eva sotto l'albero con il frutto proibito in mano, il serpente attorcigliato intorno a un ramo potrebbe portare la scritta «curiosità».

Se è vero che la curiosità, come tutte le pulsioni umane, può essere usata per fini ignobili - l'intrusione indiscreta nell'intimità altrui che ha finito per dare al termine una connotazione negativa - è pur vero che essa resta uno degli attributi più nobili della mente umana.

Infatti, la sua definizione più semplice è: «desiderio di sapere».

Questo desiderio trova la sua prima espressione nelle risposte alle esigenze pratiche della vita umana: come seminare nel modo migliore e ottenere i più abbondanti raccolti, come fabbricare nel modo migliore archi e frecce, come meglio tessere abiti - in breve, nelle «arti applicate». Ma cosa accade quando è stata ormai acquisita una certa padronanza di queste tecniche relativamente limitate, quando i bisogni pratici sono stati soddisfatti? Inevitabilmente, il desiderio di sapere conduce ad attività meno limitate e più complesse.

Appare evidente che le «belle arti» (nate con lo scopo di soddisfare embrionali bisogni spirituali, dai contorni ancora indefiniti) hanno avuto origine dalla noia. Certamente è anche possibile trovare, e con facilità, motivazioni e scopi più concreti per le belle arti: pitture e statuette erano usate, per esempio, come amuleti per propiziare la fertilità e come simboli religiosi. Tuttavia, non si può fare a meno di sospettare che tali oggetti siano venuti prima, e che solo in un secondo tempo sia sorto il loro uso specifico.

Anche affermare che le arti sono sorte dal senso del bello potrebbe equivalere a mettere il carro avanti ai buoi. Una volta sviluppate le arti, era inevitabile che esse venissero raffinate ed estese in direzione della bellezza, ma anche se questo non fosse accaduto le belle arti si sarebbero ugualmente sviluppate. Quel che è certo è che esse precedono ogni possibile esigenza o utilizzazione, salvo il bisogno elementare di occupare più completamente possibile la mente.

Non è solo la produzione di un'opera artistica a occupare la mente in maniera soddisfacente: anche la contemplazione o il godimento di tale opera assolve per il fruitore un'analoga funzione. Una grande opera d'arte è tale precisamente perché offre uno stimolo che non sarebbe facile trovare altrove. Essa contiene abbastanza dati di complessità sufficiente a indurre il cervello a esercitarsi al

di là dello stretto necessario; e tale esercitazione, a meno di non essere irreparabilmente rovinati dalla routine od ottusi, risulta gradevole.

Ma se la pratica delle belle arti costituisce una soluzione soddisfacente al problema del tempo libero, essa non è priva di svantaggi: richiede infatti, oltre a una mente attiva e creativa, un'abilità fisica. È altrettanto interessante perseguire delle attività mentali che coinvolgono la sola mente, senza l'intervento di abilità manuali; e, ovviamente, una simile attività esiste: si tratta della ricerca della conoscenza pura, non già allo scopo di «fare» qualcosa, ma per se stessa.

Sembra dunque che il desiderio di sapere conduca entro domini successivi di livello spirituale sempre più elevato, in cui la mente è più efficacemente occupata - conduca cioè dal dominio della conoscenza volta a compiti utili al dominio della conoscenza volta a realizzare opere estetiche, a quello della conoscenza «pura».

La conoscenza perseguita per amore solo del sapere è quella che va alla ricerca di risposte a domande come le seguenti: quanto è alto il cielo? perché cade una pietra? Questa è curiosità pura - curiosità del tutto oziosa, e quindi forse imperiosa al grado massimo. Dopo tutto, sembra che non serva a nulla sapere quanto sia alto il cielo o perché una pietra cada. Il cielo lassù non interferisce con le nostre faccende; per quanto riguarda poi la pietra, sapere perché cada non ci aiuta a schivarla meglio o a rendere meno duro il colpo, se essa ci raggiunge. Eppure sono sempre esistite persone che si sono poste queste domande apparentemente inutili e hanno cercato di rispondervi, spinte dal puro desiderio di sapere - a prescindere dalla necessità assoluta di tenere il cervello in attività.

Il metodo più ovvio da adottare di fronte a domande di questo genere consiste nel mettere insieme una risposta esteticamente soddisfacente, una risposta, cioè, che presenti sufficienti analogie con quanto è già noto come comprensibile e plausibile. L'espressione «mettere insieme» è piuttosto arida e poco romantica. Gli antichi amavano concepire il processo della scoperta come un'ispirazione delle Muse o una rivelazione proveniente dal cielo; ma in tutti i casi, che si trattasse di ispirazione, di rivelazione o del tipo di pensiero creativo che inventa le storie, le spiegazioni si sono sempre fondate in prevalenza sull'analogia. Il fulmine è distruttivo e terrificante, ma appare, dopo tutto, scagliato in modo analogo a un'arma, e arreca lo stesso danno di un'arma da lancio - sia pure fantasticamente violenta. Una simile arma deve essere brandita da qualcuno che abbia dimensioni altrettanto favolose, ed è così che il fulmine diventa il martello di Thor o il dardo fiammeggiante di Zeus. L'arma sovrannaturale è brandita da un uomo sovrannaturale.

Così nasce un mito. Le forze della natura vengono personificate e diventano dei. I miti interagiscono tra loro, vengono costruiti e perfezionati da generazioni di narratori, al punto che spesso ne viene oscurato il significato originario. Alcuni miti possono degenerare in storielle amene (o in racconti osceni), mentre altri possono acquisire un contenuto etico di un certo peso, che consente di introdurli significativamente nel contesto di una grande religione.

Anche la mitologia, come l'arte, può essere pura o applicata. I miti possono essere conservati per il loro fascino estetico, oppure piegati all'uso concreto, utile agli esseri umani. Per esempio, i primi coltivatori si preoccupavano molto del fenomeno della pioggia e delle ragioni per cui essa cadeva in modo tanto capriccioso. La pioggia fecondatrice che dal cielo cadeva sulla terra presentava un'ovvia analogia con l'atto sessuale; pertanto, personificando il cielo e la terra, gli esseri umani trovarono una facile spiegazione della presenza o dell'assenza della pioggia: la dea-terra o il dio-cielo erano bendisposti o irati, a seconda dei casi. Una volta accettato questo mito, i coltivatori avevano una base plausibile dell'arte di richiamare la pioggia - cioè l'arte di placare la divinità con riti appropriati, che potevano anche avere un carattere orgiastico, nel tentativo di influenzare mediante l'esempio il cielo e la terra.

I GRECI.

I miti greci sono tra i più belli e i più complessi della nostra letteratura occidentale e del nostro patrimonio culturale; furono tuttavia proprio i greci a introdurre, a un dato momento, il modo

opposto di concepire l'universo - come qualcosa di impersonale e inanimato. Per i creatori di miti tutti gli aspetti della natura erano essenzialmente umani per la loro imprevedibilità. Per maestosi e possenti che fossero le personificazioni, per sovrumani che apparissero i poteri di Giove o di Ishtar o di Iside o di Marduk o di Odino, queste divinità erano anche, proprio come i semplici esseri umani, frivole, capricciose, emotive, capaci di comportamenti violenti per motivi di poco conto, sensibili alle lusinghe come bambini.

Fintantoché l'universo era controllato da tali divinità arbitrarie e imprevedibili, non vi era alcuna speranza di poterlo comprendere, ma solo una vaga speranza di poterselo rendere amico. Invece, secondo il nuovo modo di vedere dei pensatori greci di un'epoca più tarda, l'universo era una macchina governata da leggi inflessibili. I filosofi greci ora si dedicavano allo stimolante esercizio intellettuale di cercare di scoprire esattamente quali potessero essere le leggi di natura.

Il primo ad accingersi a tale impresa, stando alla tradizione greca, fu Talete di Mileto, circa nel 600 avanti Cristo. A lui fu attribuito un numero inverosimile di scoperte dagli scrittori greci posteriori; ma potrebbe esser stato proprio lui a introdurre nel mondo greco le conoscenze raccolte dai babilonesi. A quanto pare la sua impresa più spettacolare fu la predizione di un'eclissi per il 585 avanti Cristo - eclissi che in effetti si verificò.

Impegnandosi in questo esercizio intellettuale, i greci naturalmente partivano dal presupposto che la natura «giocasse» lealmente; cioè che essa, affrontata nel modo giusto, avrebbe svelato i propri segreti, senza cambiare posizione o atteggiamento a metà del gioco. (Più di duemila anni dopo, Albert Einstein avrebbe espresso questa stessa convinzione nella sua famosa frase: «Dio potrà essere sottile, ma non è malizioso».) Si riteneva inoltre che le leggi di natura, una volta trovate, sarebbero state comprensibili. Questo ottimismo dei greci non ha mai del tutto abbandonato la razza umana.

Questa fiducia nel fair-play della natura spingeva gli esseri umani a elaborare un metodo con cui risalire sistematicamente alle leggi sottostanti a partire dai dati osservativi. Progredire da un punto all'altro mediante regole di ragionamento stabilite vuol dire usare la «ragione». Chi ragiona può usare l'«intuizione» come guida alla ricerca di risposte, ma deve attenersi a una logica rigorosa nel mettere alla prova una data teoria. Facciamo un esempio piuttosto semplice: se il brandy con acqua, il whisky con acqua, la vodka con acqua e il rum con acqua sono tutte bevande inebrianti, si potrebbe saltare alla conclusione che l'elemento inebriante debba essere l'ingrediente che queste bevande hanno in comune, cioè l'acqua.

Qualcosa in questo ragionamento è sbagliato, ma l'errore di logica non salta immediatamente all'occhio. In casi meno ovvi, poi, può essere davvero difficile scoprire l'errore.

La caccia agli errori o ai sofismi nelle argomentazioni è stato uno dei divertimenti preferiti dei pensatori dai tempi dei greci ad oggi.

Noi dobbiamo i primi fondamenti della logica sistematica ad Aristotele di Stagira, che nel quarto secolo avanti Cristo compendiò ed espose per primo le regole di un ragionamento rigoroso.

I punti essenziali della partita intellettuale giocata dall'uomo contro la natura sono tre: primo, si devono raccogliere osservazioni su un aspetto della natura; secondo, si deve dare a queste osservazioni un ordinamento (l'organizzazione non altera le osservazioni, ma si limita a facilitarne l'uso, com'è chiaro dall'esempio del gioco del bridge, in cui disponendo le carte secondo il seme e secondo il valore non le si cambia né si individua la miglior linea di gioco, ma si rende più facile effettuare scelte logiche); terzo, si deve dedurre dall'ordinamento dato alle osservazioni in proprio possesso qualche principio che riassuma le osservazioni stesse.

Per esempio, possiamo osservare che nell'acqua il marmo va a fondo, il legno galleggia, il ferro affonda anch'esso, una piuma galleggia, il mercurio affonda, l'olio d'oliva galleggia, e così via. Se mettiamo in un elenco tutti gli oggetti che affondano e in un altro tutti quelli che galleggiano e andiamo in cerca di una caratteristica che differenzi tutti gli oggetti di un gruppo da quelli dell'altro, concluderemo che gli oggetti più densi dell'acqua vanno a fondo nell'acqua, mentre quelli meno densi galleggiano.

I greci chiamarono questa maniera nuova di studiare l'universo "filosofia", che significa letteralmente «amore del sapere», o, traducendo liberamente, «desiderio di sapere».

LA GEOMETRIA E LA MATEMATICA.

I greci colsero i loro successi più brillanti nella geometria. Si possono attribuire questi successi soprattutto allo sviluppo di due tecniche: l'astrazione e la generalizzazione.

Facciamo un esempio. Gli agrimensori egizi avevano trovato un sistema pratico di formare un angolo retto: dividevano una fune in dodici parti uguali e costruivano un triangolo in cui tre parti formavano un lato, quattro parti un altro lato e cinque parti il terzo: l'angolo retto veniva a trovarsi nel punto di incontro tra il lato formato da tre parti e quello formato da quattro. Non sappiamo come gli egiziani fossero arrivati a questo metodo; a quanto sembra, il loro interesse si fermava all'utilizzazione pratica. Ma i greci, con la loro curiosità, andarono oltre, e ricercarono la ragione per cui un triangolo siffatto dovesse contenere un angolo retto. Nel corso della loro analisi, si resero conto del fatto che la costruzione materiale in se stessa era del tutto occasionale; non aveva alcuna importanza se il triangolo veniva costruito con una corda o con un filo di lino o con stecche di legno; si trattava solo di una proprietà delle «linee rette» che si incontravano formando i vari angoli. Nel concepire delle linee rette ideali, indipendenti da qualsiasi visualizzazione fisica, in grado di esistere solo nell'immaginazione, i greci crearono il metodo chiamato «astrazione» - che prescinde da ciò che non è essenziale per considerare solo quelle proprietà che sono necessarie per risolvere un problema.

I geometri greci fecero un altro passo avanti cercando delle soluzioni generali per classi di problemi, anziché affrontare i problemi uno per uno. Per esempio, una persona potrebbe scoprire, procedendo per tentativi, che un triangolo ha un angolo retto non solo se i suoi lati misurano rispettivamente 3, 4 e 5 centimetri, ma anche se ne misurano 5, 12 e 13, oppure 7, 24 e 25; ma si tratterebbe sempre di semplici numeri, e non di un concetto. I greci si chiesero se era invece possibile trovare una proprietà comune, che descrivesse tutti i triangoli rettangoli. Ragionando con molto rigore, essi mostrarono che un triangolo è rettangolo se, e solo se, tra le lunghezze dei lati sussiste la relazione x al quadrato + y al quadrato = z al quadrato, dove "z" è la lunghezza del lato maggiore. L'angolo retto si trova nel punto di incontro dei lati di lunghezza x e y. Così, nel caso di un triangolo con i lati rispettivamente di 3, 4 e 5 centimetri, elevando i lati al quadrato si ottiene: 9 + 16 = 25; analogamente, facendo il quadrato dei lati 5, 12 e 13 si ottiene 25 + 144=169, e facendo il quadrato di 7, 24 e 25 si ha: 49 + 576 = 625. Questi sono solo tre casi su un'infinità di casi possibili, e pertanto si tratta di banalità. Ciò che interessava ai greci era la scoperta di una prova che la relazione tra i lati dovesse valere in tutti i casi. Ed essi si dedicarono alla geometria come mezzo elegante per scoprire e formulare questo tipo di generalizzazioni.

Vari matematici greci fornirono la dimostrazione di relazioni esistenti tra le linee e i punti delle figure geometriche. La dimostrazione riguardante i triangoli rettangoli fu elaborata - così si ritiene - da Pitagora di Samo intorno al 525 avanti Cristo e ancora oggi viene chiamata, in suo onore, teorema di Pitagora.

Verso il 300 avanti Cristo Euclide raccolse i teoremi matematici noti al suo tempo e diede loro un ordine razionale, tale che ciascuno di essi potesse essere dimostrato in base ai teoremi dimostrati in precedenza. Naturalmente questo sistema rinviava all'inizio a qualcosa di indimostrabile: cioè, se ogni teorema doveva essere dimostrato con l'aiuto di un altro teorema già dimostrato, come si poteva dimostrare il teorema numero uno? La soluzione consistette nel partire dall'enunciazione di verità talmente evidenti e accettabili da tutti da non aver bisogno di essere dimostrate. Un siffatto enunciato viene chiamato «assioma». Euclide riuscì a ridurre gli assiomi accettati ai suoi tempi a un numero assai limitato di enunciati molto semplici; con questi soli assiomi, costruì un sistema complesso e magistrale, chiamato «geometria euclidea» Mai prima di allora si era costruito un edificio così potente e così solido partendo da così poco: il premio di

Euclide fu il fatto che il suo trattato è rimasto nell'uso, con qualche modificazione secondaria, per più di duemila anni.

IL PROCESSO DEDUTTIVO.

L'elaborazione di un corpo di conoscenze come conseguenza inevitabile di un insieme di assiomi («deduzione») è un gioco affascinante. I greci se ne innamorarono - grazie al successo della loro geometria - al punto di commettere due gravi errori.

Innanzitutto essi finirono per considerare la deduzione come l'unico mezzo rispettabile per raggiungere la conoscenza. Essi erano del tutto consapevoli del fatto che per certi tipi di conoscenza la deduzione era inadeguata: per esempio non si può dedurre la distanza da Corinto ad Atene da principi astratti, ma la si deve misurare. Pur essendo disposti a osservare la natura quando era necessario, i greci si vergognarono sempre di tale necessità, ritenendo che il genere di conoscenza più elevato fosse quello a cui si giungeva tramite l'attività mentale. Essi tendevano a sottovalutare le conoscenze connesse direttamente con la vita quotidiana. Si narra che un allievo di Platone, a cui il maestro stava impartendo degli insegnamenti di matematica, abbia chiesto impazientemente alla fine: «Ma a cosa serve tutto ciò?». Platone, profondamente offeso, chiamò uno schiavo e, ordinandogli di dare all'allievo una moneta, disse: «Ora non penserai più che l'insegnamento ricevuto sia stato del tutto inutile». Con ciò, l'allievo fu espulso.

È diffusa la convinzione che questa mentalità altera e distaccata abbia la sua origine nel fatto che la cultura greca era basata sull'esistenza della schiavitù: tutte le faccende materiali, in tale società, erano delegate agli schiavi. Può darsi che così stiano le cose, ma io sono propenso a credere che i greci considerassero la filosofia come una sorta di sport, di gioco intellettuale. Molti considerano chi pratica lo sport non professionalmente come un gentleman, socialmente superiore ai professionisti che dallo sport traggono il loro sostentamento. Noi ci atteniamo ancora a questo concetto di purezza quando oggi prendiamo precauzioni al limite del ridicolo per assicurarci che i partecipanti ai giochi olimpici siano esenti da ogni traccia di professionismo. La teorizzazione da parte dei greci del «culto dell'inutile» potrebbe essersi basata, analogamente, sull'idea che permettere alle conoscenze mondane (come quella della distanza tra Corinto e Atene) di entrare in un ragionamento astratto sarebbe equivalso a permettere all'imperfezione di penetrare nell'Eden della vera filosofia. Comunque, quali che fossero le loro razionalizzazioni, i greci rimasero gravemente limitati da questo atteggiamento. Anche se la Grecia non fu avara di contributi pratici alla storia della civiltà, perfino il suo grande inventore, Archimede di Siracusa, si rifiutò di mettere per scritto le proprie invenzioni e scoperte concrete: per conservare la propria condizione non professionale, rese noti solo i risultati raggiunti nell'ambito della matematica pura. La mancanza di interesse per le cose di questa terra - invenzioni, esperimenti, studio della natura - non fu che uno dei fattori che posero dei limiti al pensiero greco.

L'importanza data dai greci allo studio puramente formale e astratto, il loro stesso grande successo nella geometria, li indusse a compiere il secondo grande errore, che li portò infine a un punto morto. Sedotti dal successo degli assiomi nella costruzione di un sistema di geometria, i greci finirono per considerarli come «verità assolute», supponendo che anche altri rami della conoscenza andassero costruiti a partire da analoghe «verità assolute». Così, nell'astronomia finirono per considerare come verità autoevidenti le idee che: 1) la terra stesse immobile e fosse al centro dell'universo; 2) la terra fosse corrotta e imperfetta, mentre i cieli erano eterni, immutabili e perfetti. E poiché secondo i greci la curva perfetta era il cerchio, dato che i cieli erano perfetti ne conseguiva che tutti i corpi celesti si dovessero muovere circolarmente intorno alla terra. Con il tempo l'osservazione (motivata dalle esigenze della navigazione e della compilazione di calendari) mostrò loro che i pianeti non descrivono dei semplici cerchi perfetti; ciò obbligò i greci a consentire ai pianeti di muoversi secondo combinazioni sempre più complicate di cerchi. Tali combinazioni vennero esposte verso il 150 dopo Cristo da Claudio Tolomeo, ad Alessandria, sotto forma di un

sistema terribilmente complesso. Analogamente Aristotele aveva elaborato delle fantasiose teorie sul moto a partire da assiomi «autoevidenti» come quello che afferma che la velocità con cui cade un oggetto è proporzionale al suo peso. (Tutti, infatti, potevano osservare che una pietra cadeva più rapidamente di una piuma.)

Orbene, questo culto della deduzione da assiomi autoevidenti era destinato a portare sull'orlo di un precipizio, senza via di scampo: una volta che i greci ebbero sviluppato tutte le implicazioni degli assiomi, sembravano impossibili ulteriori scoperte importanti in matematica o in astronomia. La conoscenza filosofica appariva completa e perfetta: per quasi duemila anni dopo l'Età dell'Oro della Grecia, di fronte a qualsiasi domanda relativa all'universo materiale, prevalse la tendenza a risolvere il problema, con soddisfazione di tutti, ricorrendo alla frase: «Aristotele afferma...», oppure «Euclide dice...».

IL RINASCIMENTO E COPERNICO.

Avendo risolto i problemi della matematica e dell'astronomia, i greci si volsero a campi più reconditi e più stimolanti della conoscenza: uno di questi era l'anima umana.

Platone si era interessato soprattutto a questioni come: cos'è la giustizia?, oppure, cos'è la virtù?, piuttosto che all'esame delle ragioni per cui la pioggia cade o del modo in cui i pianeti si muovono. Nella sua qualità di massimo filosofo morale della Grecia, egli soppiantò Aristotele, il massimo filosofo della natura. I pensatori greci del periodo romano si sentirono sempre più attratti dal piacere raffinato delle questioni di filosofia morale, allontanandosi dall'evidente sterilità della filosofia naturale. Gli ultimi sviluppi della filosofia antica furono rappresentati dal «neoplatonismo», una dottrina decisamente mistica, formulata da Plotino verso il 250 dopo Cristo.

Il cristianesimo, dando la priorità alla natura di Dio e al Suo rapporto con l'uomo, introdusse una dimensione totalmente nuova nella filosofia morale, che accrebbe la propria superiorità rispetto alla filosofia naturale come processo di ricerca intellettuale. Dal 200 dopo Cristo al 1200 gli europei si occuparono quasi esclusivamente di filosofia morale, in particolare di teologia. La filosofia naturale fu quasi dimenticata.

Furono invece gli arabi che fecero di tutto per mantenere vivo il pensiero di Aristotele e Tolomeo durante il Medioevo; attraverso gli autori arabi la filosofia naturale greca finì per tornare a diffondersi nell'Europa occidentale. Verso il 1200 era ormai stato riscoperto Aristotele. Ulteriori apporti provennero dal morente impero bizantino, che era l'ultima area europea a mantenere una continuità con la tradizione culturale dei giorni gloriosi della Grecia.

La prima e più naturale conseguenza della riscoperta di Aristotele fu l'applicazione del suo sistema di logica e di ragionamento alla teologia. Verso il 1250 il teologo italiano Tommaso d'Aquino edificò il sistema che venne chiamato «tomismo», basato su principi aristotelici; esso rappresenta ancora oggi la base teologica della Chiesa cattolica romana. Gli europei, però, si accinsero ben presto ad applicare il ritrovato pensiero greco anche in campi secolari.

Gli uomini più importanti del Rinascimento spostarono il loro interesse dalle questioni relative a Dio alle opere dell'umanità, e pertanto vennero chiamati «umanisti»; ancora oggi vengono chiamate materie umanistiche quelle in cui si studia la letteratura, l'arte e la storia.

I pensatori del Rinascimento introdussero una mentalità nuova nella filosofia naturale greca, le cui concezioni non apparivano più soddisfacenti. Nel 1543 l'astronomo polacco Niccolò Copernico pubblicò un libro che osava respingere un assioma fondamentale dell'astronomia, proponendo di considerare il sole, anziché la terra, come centro dell'universo. (Copernico, tuttavia, conservava il concetto che la terra e gli altri pianeti seguissero orbite circolari.) Questo assioma nuovo permetteva di dare una spiegazione più semplice ai moti osservati dei corpi celesti. L'assioma copernicano secondo cui la terra era in moto era però assai meno «autoevidente» dell'assioma greco secondo cui la terra era immobile; non vi è quindi da sorprendersi se ci volle più di mezzo secolo perché la teoria copernicana venisse accettata.

In un certo senso il sistema copernicano in se stesso non costituiva un cambiamento cruciale. Copernico si era limitato a scambiare tra loro degli assiomi, cosa che Aristarco di Samo aveva già anticipato duemila anni prima, mettendo il sole al centro. Con ciò non intendo dire che cambiare un assioma sia cosa di poco conto: quando i matematici del diciannovesimo secolo misero in dubbio gli assiomi di Euclide, sviluppando delle «geometrie non-euclidee», basate su assunti diversi, esercitarono una profonda influenza sul pensiero nei campi più svariati; oggi si ritiene che la struttura e la stessa storia dell'universo seguano una geometria non-euclidea piuttosto che quella - conforme al «senso comune» - di Euclide. Ma la rivoluzione a cui Copernico diede inizio non implicava solo un cambiamento di assiomi; essa portava in sé i germi di un approccio completamente nuovo alla natura. Questa rivoluzione fu realizzata dall'italiano Galileo Galilei verso la fine del sedicesimo secolo.

SPERIMENTAZIONE E INDUZIONE.

I greci, in complesso, si erano accontentati di accettare i fatti «evidenti» della natura come punto di partenza dei loro ragionamenti.

Non risulta che Aristotele abbia mai preso due pietre di peso diverso e le abbia fatte cadere, per verificare il suo assunto che la velocità di caduta è proporzionale al peso di un oggetto. Ai greci la sperimentazione appariva irrilevante; essa interferiva con la bellezza della deduzione pura, diminuendone il pregio. Inoltre, se un esperimento era in disaccordo con una deduzione, come si poteva essere sicuri che l'esperimento fosse valido? Era verosimile che il mondo imperfetto della realtà concordasse completamente con il mondo perfetto delle idee astratte? E, in caso contrario, forse che si sarebbe dovuto adattare il perfetto alle esigenze dell'imperfetto? La verifica di una teoria perfetta eseguita mediante strumenti imperfetti non appariva agli occhi dei filosofi greci come una strada valida per raggiungere la conoscenza.

La sperimentazione cominciò ad acquistare rispettabilità filosofica in Europa per merito di filosofi come Ruggero Bacone (un contemporaneo di Tommaso d'Aquino) e come il suo omonimo Francesco Bacone (un contemporaneo di Galileo Galilei). Ma fu proprio Galileo a rovesciare il punto di vista dei greci, realizzando una rivoluzione. Egli aveva una logica convincente ed era un genio della divulgazione: descrisse i suoi esperimenti ed espose le sue idee in modo così chiaro e così suggestivo da conquistare la comunità colta d'Europa, che accettò, oltre ai suoi risultati, i suoi metodi.

Secondo l'episodio più noto della sua attività di scienziato, Galileo verificò la teoria aristotelica sulla caduta dei corpi ponendo la domanda alla natura in modo tale che tutta l'Europa potesse udire la risposta. Si narra che sia salito in cima alla Torre Pendente di Pisa e abbia lasciato cadere contemporaneamente due sfere del peso rispettivo di 10 e di 1 libbra: il tonfo dei due gravi che colpirono il suolo esattamente nello stesso istante uccise la fisica di Aristotele.

Probabilmente Galileo in realtà non effettuò proprio questo esperimento, ma l'episodio esemplifica in modo così tipico i suoi metodi spettacolari che non fa meraviglia che esso sia stato ritenuto autentico per secoli.

Ciò che sicuramente Galileo fece fu di far rotolare delle palle lungo dei piani inclinati, misurando lo spazio da esse percorso in tempi determinati. Egli fu il primo a condurre degli esperimenti tenendo conto del tempo e a effettuare misurazioni sistematiche.

La sua rivoluzione consistette nel mettere la «induzione» al di sopra della «deduzione» come metodo logico della scienza. Anziché giungere alle conclusioni in base a un insieme di generalizzazioni assunte come vere, il metodo induttivo parte dalle osservazioni e da esse ricava delle generalizzazioni (o, se preferite, degli assiomi). Naturalmente anche i greci ricavavano gli assiomi dall'osservazione: l'assioma di Euclide che una linea retta costituisce la distanza minima tra due punti era un giudizio intuitivo basato sull'esperienza. Ma, mentre il filosofo greco minimizzava il ruolo svolto dall'induzione, lo scienziato odierno considera l'induzione come il processo

principale nel raggiungimento della conoscenza, l'unico modo di giustificare le generalizzazioni. Anzi, lo scienziato ammette addirittura che nessuna generalizzazione può considerarsi valida se non viene reiteratamente verificata mediante esperimenti continuamente ripetuti - la verifica continua di ogni ulteriore induzione.

Il punto di vista accettato generalmente oggigiorno è esattamente l'opposto di quello dei greci. Ben lungi dal considerare il mondo reale come una rappresentazione imperfetta della verità ideale, noi consideriamo le generalizzazioni come rappresentazioni imperfette del mondo reale. Neppure il più gran numero di verifiche induttive può rendere una generalizzazione completamente e assolutamente valida.

Anche se miliardi di osservazioni tendono a confermare una generalizzazione, basta una sola osservazione che la contraddica o che sia incompatibile con essa a obbligarci a modificarla. Indipendentemente dal numero di volte in cui una teoria supera con successo ogni verifica, non può esistere la certezza che essa non venga falsificata dall'osservazione successiva.

Questa è dunque una pietra angolare della filosofia naturale moderna.

Essa non pretende di arrivare alla verità ultima. Anzi, la stessa espressione «verità ultima» diventa priva di significato, perché non esiste la possibilità di effettuare un numero di osservazioni sufficiente a rendere la verità certa e pertanto «ultima». I filosofi greci non riconoscevano un simile limite. Di più, essi non scorgevano alcuna difficoltà nell'applicare uno stesso metodo di ragionamento per rispondere alla domanda «Cos'è la giustizia?» e a quella «Cos'è la materia?». La scienza moderna, invece, fa una netta distinzione tra i due tipi di domande. Il metodo induttivo non può generalizzare su ciò che non può osservare; e dato che la natura dell'anima umana, per esempio, non è osservabile con i metodi diretti fino a oggi noti, questo tema resta al di fuori del dominio del metodo induttivo.

La vittoria della scienza moderna non fu completa finché essa non stabilì un altro principio essenziale - la libera comunicazione e collaborazione tra tutti gli scienziati. Anche se oggi una simile necessità appare ovvia, non lo era per i filosofi dell'antichità e del Medioevo. Nell'antica Grecia, i pitagorici formavano una società segreta che teneva per sé le proprie scoperte matematiche. Nel Medioevo gli alchimisti resero deliberatamente oscuri i loro scritti per mantenere le loro presunte scoperte entro una cerchia più ristretta possibile. Nel sedicesimo secolo il matematico italiano Niccolò Tartaglia, che aveva scoperto un sistema per risolvere le equazioni cubiche, non vedeva niente di male nel tentativo di tenere la cosa segreta. Quando Gerolamo Cardano, un collega matematico che si era fatto confidare la soluzione da Tartaglia con la promessa di mantenerla segreta, la rese pubblica, Tartaglia ebbe una naturale reazione dl sdegno; ma, a parte il fatto che Cardano non aveva mantenuto una promessa, perpetrando così un inganno, egli aveva certamente ragione nel ribattere che una simile scoperta doveva assolutamente essere divulgata.

Oggigiorno una scoperta scientifica non è considerata tale se viene mantenuta segreta. Il chimico inglese Robert Boyle, un secolo dopo Tartaglia e Cardano, insistette sull'importanza di pubblicare tutte le osservazioni scientifiche nei minimi dettagli. Inoltre un'osservazione o una scoperta non viene considerata valida, anche dopo esser stata pubblicata, finché almeno un altro ricercatore non ha ripetuto la stessa osservazione, «confermandola». La scienza non è il prodotto di singoli individui, ma di una «comunità scientifica».

Uno dei primi gruppi (e certamente il più famoso) che rappresentò una siffatta comunità scientifica fu la Royal Society of London for Improving Natural Knowledge, chiamata di solito semplicemente «Royal Society». Essa nacque da riunioni informali, iniziate circa nel 1645, di un gruppo di gentiluomini che si interessavano dei nuovi metodi scientifici introdotti da Galileo. Nel 1660 la Società venne resa ufficiale dal re Carlo Secondo.

I membri della Royal Society si riunivano e discutevano i loro risultati apertamente, scrivevano delle lettere in cui li esponevano in lingua inglese anziché in latino, e perseguivano i loro esperimenti con energia ed entusiasmo. Purtuttavia, per quasi tutto il diciassettesimo secolo, essi mantennero una posizione difensiva.

L'atteggiamento di molti loro contemporanei colti potrebbe essere rappresentato da una vignetta (secondo l'uso moderno), in cui le ombre superbe di Pitagora, Euclide e Aristotele guardano dall'alto boriosamente dei fanciulli che giocano con le biglie, sotto alla scritta «Royal Society».

Tutto questo cambiò grazie all'opera di Isaac Newton, il quale fu membro della Società. Partendo dalle osservazioni e dalle conclusioni di Galileo, dell'astronomo danese Tycho Brahe e di quello tedesco Giovanni Keplero, che comprese che le orbite dei pianeti erano ellittiche, Newton arrivò per induzione alle sue tre semplici leggi del moto e alla sua grande generalizzazione fondamentale - la legge della gravitazione universale. (Eppure, nel pubblicare le sue scoperte, Newton ricorse alla geometria e al metodo di spiegazione deduttiva dei greci.) Il mondo colto rimase talmente impressionato da questa scoperta che Newton fu idolatrato, quasi deificato, già durante la sua vita. Questo nuovo universo imponente, eretto su alcuni semplici assunti ottenuti con processi induttivi, ora faceva apparire i filosofi greci come fanciulli intenti a giocare con le biglie. La rivoluzione iniziata da Galileo al principio del diciassettesimo secolo era stata trionfalmente completata da Newton alla fine del secolo.

LA SCIENZA MODERNA.

Sarebbe bello poter dire che da allora la scienza e gli esseri umani vissero insieme felici e contenti. Ma la verità è che per entrambi le vere difficoltà stavano solo per cominciare. Finché la scienza era restata deduttiva, la filosofia naturale poteva far parte della cultura generale di tutti gli uomini istruiti (quanto alle donne, purtroppo fino a non molto tempo fa era ben raro che ricevessero un'istruzione). Ma la scienza induttiva diventò una fatica immensa, che richiedeva un grande lavoro di osservazione, apprendimento, analisi. Non era più un gioco per dilettanti. Tale complessità non ha fatto che crescere. Nel secolo successivo a quello di Newton, era ancora possibile per un uomo di capacità fuor del comune padroneggiare tutti i campi della conoscenza scientifica; ma nel 1800 questo era ormai del tutto impossibile. Con il passare del tempo, è diventato sempre più necessario per ogni scienziato limitarsi a un settore del proprio campo di studio. La specializzazione è ormai una strada obbligata per la scienza, proprio a causa della sua crescita inesorabile. E a ogni generazione di scienziati, la specializzazione non ha fatto che accrescersi.

Le pubblicazioni degli scienziati sulle loro ricerche non sono mai state così copiose come oggi - e mai tanto illeggibili per chiunque fuorché i colleghi di quella specializzazione. Questo ha costituito un grosso handicap per la stessa scienza, perché spesso i progressi fondamentali nella conoscenza scientifica nascono dalla fecondazione incrociata di diversi campi del sapere. Ancora più deprecabile è il fatto che la scienza ha perso sempre più il contatto con chi non è scienziato. In tale situazione si è finito per considerare gli scienziati come una sorta di maghi, più temuti che ammirati.

L'impressione che la scienza sia magia incomprensibile, salvo che per pochi eletti che sono diversi, in modo sospetto, dall'umanità ordinaria, è destinata ad allontanare molti giovani dalla scienza. Dopo la seconda guerra mondiale si sono diffusi tra i più giovani forti sentimenti di decisa ostilità nei confronti della scienza - e ciò anche tra gli studenti. La nostra civiltà industrializzata è basata sulle scoperte scientifiche degli ultimi due secoli, e la nostra società si scopre afflitta dagli effetti collaterali indesiderabili del suo stesso successo.

Tecniche progredite in medicina hanno determinato un aumento vertiginoso della popolazione; le industrie chimiche e i motori a combustione interna stanno inquinando le nostre acque e la nostra aria; la domanda di materiali e di energia sta esaurendo e distruggendo la crosta terrestre. La colpa di tutto ciò viene troppo facilmente attribuita alla scienza e agli scienziati da coloro che non arrivano a comprendere che, se la conoscenza può creare dei problemi, non è certo attraverso l'ignoranza che li possiamo risolvere.

Ma non è inevitabile che la scienza resti completamente misteriosa per i non-scienziati. Si potrebbe far molto per colmare questa distanza se gli scienziati si assumessero il compito di comunicare - spiegando i risultati del proprio lavoro in modo semplice al maggior numero possibile di persone - e se i non-scienziati, da parte loro, accettassero come un dovere quello di ascoltare. Per rendersi conto in modo soddisfacente degli sviluppi di un settore scientifico, non è indispensabile avere una comprensione totale della scienza. Dopo tutto, nessuno pensa che si debba saper scrivere una grande opera letteraria per poter apprezzare Shakespeare. Per ascoltare una sinfonia di Beethoven godendone non occorre esser capaci di comporre una sinfonia di pari valore. Analogamente si possono apprezzare le conquiste scientifiche e trarne godimento, anche se non si è personalmente portati a svolgere un lavoro creativo nell'ambito della scienza.

Ma cosa si deve fare, potreste chiedere. La prima risposta è che nessuno può sentirsi veramente a proprio agio nel mondo moderno e valutare la natura dei suoi problemi - e le possibili soluzioni degli stessi - se non ha un'idea esatta di cosa faccia la scienza. Inoltre, l'iniziazione al meraviglioso mondo della scienza è fonte di grande soddisfazione estetica, di ispirazione per i giovani, di appagamento del desiderio di sapere e di un più profondo apprezzamento delle mirabili potenzialità e capacità della mente umana.

È per offrire questa iniziazione che mi sono accinto a scrivere questo libro.

Capitolo 2.
L'UNIVERSO.

DIMENSIONI DELL'UNIVERSO.

Non c'è nulla nel cielo che lo faccia apparire particolarmente distante a un osservatore casuale: i bambini non hanno difficoltà ad accettare storielle fantastiche come quella della «mucca che spiccò un salto sulla luna», o simili. Gli antichi greci, nel loro stadio mitico, non vedevano niente di strano o ridicolo nella credenza che il cielo poggiasse sulle spalle di Atlante. Naturalmente, Atlante avrebbe potuto avere un'altezza astronomica, ma un altro mito induce a pensare che così non fosse. Atlante fu indotto da Ercole ad aiutarlo a compiere l'undicesima delle sue famose dodici fatiche - la conquista delle mele d'oro (arance?) delle Esperidi («nel lontano occidente» - forse la Spagna). Mentre Atlante andava a impadronirsi delle mele, Ercole salì in cima a un monte per reggere il cielo. Anche ammesso che Ercole fosse un bel pezzo d'uomo, egli tuttavia non era un gigante; ne consegue che gli antichi greci accettavano tranquillamente l'idea che il cielo fosse solo pochi metri più alto della cima delle montagne. Vien naturale di supporre, tanto per cominciare, che il cielo altro non sia che una volta rigida in cui i corpi luminosi celesti sono incastonati come gioielli. (Così la Bibbia parla del cielo chiamandolo il «firmamento», parola che ha la stessa radice latina del termine «fisso».) Già in un periodo che va dal sesto al quarto secolo avanti Cristo gli astronomi greci si resero conto che le volte dovevano essere più di una. Infatti, mentre le stelle «fisse» giravano intorno alla terra tutte insieme, apparentemente senza mutare le loro posizioni relative, lo stesso non accadeva per il sole, la luna e per cinque oggetti luminosi simili a stelle, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno, i quali si muovevano seguendo ciascuno un proprio percorso indipendente. Questi sette corpi vennero chiamati pianeti (da una parola greca che significa «errante») e apparve evidente che non potevano essere attaccati alla stessa volta che reggeva le stelle.

I greci supposero che ciascun pianeta fosse situato su una propria volta sferica invisibile, che le volte fossero sistemate l'una sopra all'altra, e che quella più vicina appartenesse al pianeta che si muove più velocemente. Il moto più veloce era quello della luna, che percorreva un'orbita completa nel cielo in circa ventisette giorni e un terzo. Al di là della luna, sempre secondo i greci, si trovavano nell'ordine Mercurio, Venere, il sole, Marte, Giove e Saturno.

LE PRIME MISURAZIONI.

La prima misurazione scientifica di una distanza cosmica risale al 240 avanti Cristo circa. Eratostene di Cirene, che dirigeva la Biblioteca di Alessandria, allora l'istituzione scientifica più avanzata del mondo, si domandò come mai il 21 giugno, quando il sole a mezzogiorno si trovava esattamente a perpendicolo sopra la città di Siene, in Egitto, non fosse invece esattamente allo zenit, sempre a mezzogiorno, al di sopra della città di Alessandria, circa 800 chilometri a nord di Siene. Eratostene, per spiegare questo fatto, giunse alla conclusione che la superficie della terra doveva essere curva. Dalla lunghezza dell'ombra rilevata ad Alessandria a mezzogiorno del solstizio era possibile, in base a semplici ragionamenti geometrici, calcolare quale fosse la curvatura della terra lungo gli 800 chilometri di distanza che separavano Siene da Alessandria; da ciò si potevano calcolare la circonferenza e il diametro della terra, supponendo che essa avesse forma sferica - cosa che gli astronomi greci del tempo erano pronti ad ammettere.

Eratostene trovò la soluzione (in unità di lunghezza greche); i valori numerici a cui giunse, per quello che possiamo giudicare, equivalevano, tradotti nelle nostre unità di lunghezza, a circa 13 mila chilometri per il diametro e 40 mila per la circonferenza terrestri, cioè a valori numerici quasi esatti. Purtroppo i risultati trovati da Eratostene non furono accettati: verso il 100 avanti Cristo un altro astronomo greco, Posidonio di Apamea, ripeté l'operazione compiuta da Eratostene, giungendo invece alla conclusione che la circonferenza della terra era di soli 29 mila chilometri circa.

Fu proprio questo valore inferiore a essere accettato nell'antichità, e poi per tutto il Medioevo. Anche Colombo prese per buono questo valore e credette che un viaggio di 3000 miglia (meno di 5000 chilometri) verso ovest lo avrebbe portato in Asia. Se avesse conosciuto le vere dimensioni della terra, forse non si sarebbe avventurato in una simile impresa. Fu solo nel 1521-1523, quando la flotta di Magellano (o meglio, l'unica nave rimasta di tale flotta) compì finalmente la circumnavigazione del globo, che si stabilì che il valore trovato da Eratostene era quello esatto.

Ipparco di Nicea calcolò, attorno al 150 avanti Cristo, la distanza dalla terra alla luna in funzione del diametro terrestre, ricorrendo a un metodo che era stato proposto un secolo prima da Aristarco di Samo, il più audace degli astronomi greci. I greci avevano già compreso che le eclissi di luna erano causate dal fatto che la terra veniva a trovarsi tra il sole e la luna. Aristarco intuì che quando l'ombra della terra si proiettava sulla luna, la curvatura di tale ombra poteva indicare le dimensioni relative della terra e della luna. Su tale base, avvalendosi dei metodi geometrici, era possibile calcolare la distanza della luna in funzione del diametro terrestre. Ipparco, ripetendo quest'operazione, calcolò che la distanza tra la luna e la terra era 30 volte il diametro di quest'ultima; se dunque era esatto il valore numerico proposto da Eratostene di 13 mila chilometri per il diametro terrestre, la luna doveva trovarsi a circa 390 mila chilometri dalla terra. Anche questo valore risulta quasi corretto.

Il calcolo della distanza della luna fu però l'unico risultato - o almeno l'unico risultato esatto - che gli astronomi greci riuscirono a ottenere per quanto riguarda il problema delle dimensioni dell'universo. Aristarco aveva fatto un tentativo audacissimo di determinare la distanza del sole. Il metodo geometrico da lui usato era assolutamente corretto in teoria, ma richiedeva di misurare delle differenze angolari talmente piccole che egli non riuscì a ottenerne dei valori soddisfacenti, privo com'era dei nostri strumenti moderni.

Egli giunse alla conclusione che il sole era a una distanza pari a circa venti volte la distanza della luna (mentre in realtà è pari a circa 400 volte). Anche se giunse a valori errati, Aristarco da essi poté tuttavia dedurre che il sole doveva essere grande almeno sette volte più della terra; facendo osservare quanto fosse illogico supporre che un corpo più grande girasse intorno a uno più piccolo, Aristarco affermò che doveva essere la terra a girare intorno al sole. Purtroppo nessuno gli diede ascolto. Gli astronomi che vennero dopo di lui, a cominciare da Ipparco per finire con

Claudio Tolomeo, studiarono tutti i moti celesti in base alla supposizione che la terra fosse immobile e stesse al centro dell'universo, con la luna a una distanza di 390 mila chilometri e gli altri oggetti a una distanza maggiore, non determinata. Questo schema andò per la maggiore fino al 1543, quando Niccolò Copernico pubblicò il suo libro, che tornava alle idee di Aristarco e spodestava per sempre la terra dalla sua posizione privilegiata al centro dell'universo.

MISURAZIONE DEL SISTEMA SOLARE.

Il semplice fatto di porre il sole al centro del sistema solare non contribuiva di per sé a determinare la distanza dei pianeti. Copernico adottò il valore trovato dai greci per la distanza della luna, ma non aveva la minima idea della distanza del sole. Fu solo nel 1650 che un astronomo belga, Godefroy Wendelin, ripeté le osservazioni di Aristarco con strumenti progrediti, arrivando alla conclusione che la distanza del sole non era 20 volte quella della luna (8 milioni di chilometri), ma 240 volte (96 milioni di chilometri). Era ancora una stima troppo piccola, ma molto più vicina a quella reale.

Nel frattempo, nel 1609, l'astronomo tedesco Giovanni Keplero aveva aperto la strada a una determinazione esatta delle distanze dei pianeti con la sua scoperta che le loro orbite non erano circolari, ma ellittiche. Per la prima volta era possibile calcolare con precisione le orbite dei pianeti, e inoltre tracciare una mappa in scala del sistema solare; cioè si potevano determinare le distanze relative e le forme delle orbite di tutti i pianeti noti del sistema. Pertanto, se si fosse potuto calcolare il valore numerico, in unità di lunghezza, della distanza di due pianeti qualsiasi del sistema, sarebbe stato possibile calcolare immediatamente tutte le altre distanze. Non era dunque necessario calcolare direttamente la distanza del sole, come avevano cercato di fare Aristarco e Wendelin. Sarebbe stata sufficiente la determinazione della distanza di un qualsiasi corpo più vicino, purché esterno al sistema terra-luna, per esempio Marte o Venere.

Un metodo per calcolare le distanze cosmiche è quello basato sulla "parallasse". Il significato di questo termine è facile da spiegarsi: mettete un dito alla distanza di una decina di centimetri dagli occhi e guardatelo prima con l'occhio sinistro, poi con il destro; vedrete il vostro dito spostarsi rispetto allo sfondo, perché avete cambiato il vostro punto di vista. Se ora ripetete lo stesso procedimento tenendo il dito più lontano, per esempio alla distanza del braccio teso, esso si sposterà ancora rispetto allo sfondo, ma meno di prima; l'entità dello spostamento può quindi servire a determinare la distanza del dito dai vostri occhi. Naturalmente se un oggetto dista una ventina di metri il cambiamento di posizione quando lo si guarda con l'uno o con l'altro occhio comincia a essere troppo piccolo per essere misurato; si deve avere una «linea di base» maggiore della distanza tra i due occhi. Per ottenere uno spostamento maggiore del punto di vista basterà guardare l'oggetto prescelto da una determinata posizione, poi spostarsi, per esempio di qualche metro a destra, e guardare di nuovo: ora la parallasse è sufficiente per essere facilmente misurata e si può determinare la distanza. È proprio a questo metodo che si ricorre per determinare l'ampiezza di un fiume o di un burrone.

Precisamente questo stesso metodo si può usare per misurare la distanza tra la terra e la luna: ora sono le stelle a fungere da sfondo. Guardata da un osservatorio in California, per esempio, la luna avrà una certa posizione rispetto alle stelle; guardata nello stesso istante da un osservatorio situato in Inghilterra, avrà una posizione leggermente diversa. In base a questo cambiamento di posizione, conoscendo la distanza tra i due osservatori (misurata lungo una linea retta che attraversi la terra), si può calcolare la distanza della luna. Naturalmente possiamo, in teoria, ampliare la linea di base ricorrendo a osservatori situati in punti diametralmente opposti della terra; in tal caso la linea di base è pari a circa 12800 chilometri. L'angolo di parallasse che ne risulta, diviso per due, è detto "parallasse geocentrica".

Il cambiamento di posizione di un corpo celeste vien misurato in gradi o in sottomultipli di grado, cioè in minuti e secondi. Un grado è 1/360 della circonferenza celeste; ogni grado viene

suddiviso in 60 minuti di arco e ogni minuto in 60 secondi di arco. Un minuto di arco è quindi 1 diviso (360 per 60), cioè 1 su 21600 dell'intero arco celeste, mentre un secondo di arco è uguale a 1 su (21600 per 60) = 1 su 1296000 della circonferenza celeste.

Usando la trigonometria (l'insieme delle relazioni tra lati e angoli di un triangolo), Claudio Tolomeo riuscì a misurare la distanza della luna in base alla sua parallasse, arrivando a un risultato che coincideva con quello trovato in precedenza da Ipparco. La parallasse geocentrica della luna risultò di 57 minuti d'arco (quasi un grado).

Lo spostamento ha all'incirca l'ampiezza di una normale moneta vista da un metro e mezzo di distanza, ed è abbastanza facile, quindi, da misurarsi anche a occhio nudo. Quando, però, si volle misurare la parallasse del sole o di un pianeta, si vide che gli angoli interessati erano troppo piccoli: l'unica conclusione a cui si poté giungere fu quella che gli altri corpi erano molto più lontani della luna; di quanto, però, era impossibile dire.

La trigonometria da sola, nonostante tutti i perfezionamenti introdotti dagli arabi durante il Medioevo e dai matematici europei del sedicesimo secolo, non poteva fornire la risposta. La misurazione di piccoli angoli di parallasse divenne invece possibile con l'invenzione del telescopio (che Galileo costruì per primo, e per primo puntò verso il cielo nel 1609, dopo aver sentito parlare di uno strumento capace di ingrandire, fabbricato qualche mese prima da un occhialaio olandese).

Il metodo della parallasse fu applicato a distanze superiori a quella della luna nel 1673, allorquando un astronomo francese di origine italiana, Gian Domenico Cassini, misurò la parallasse di Marte. Egli determinò la posizione di Marte rispetto alle stelle, mentre, la stessa sera, l'astronomo francese Jean Richer, nella Guiana francese, compiva l'identica osservazione. Combinando le due osservazioni, Cassini ottenne la parallasse cercata e calcolò le dimensioni del sistema solare, arrivando al valore di 138 milioni di chilometri per la distanza del sole dalla terra - cifra inferiore solo del 7 per cento a quella considerata valida oggi.

Da allora sono state misurate svariate parallassi all'interno del sistema solare, con precisione sempre maggiore. Nel 1931 un vasto progetto internazionale si propose di determinare la parallasse di un pianetino, Eros, che in quell'epoca si sarebbe avvicinato alla terra più di qualsiasi altro corpo celeste, salvo la luna. In tale occasione la parallasse di Eros risultò abbastanza ampia da consentire una misurazione considerevolmente precisa, che permise a sua volta di determinare le dimensioni del sistema solare con maggior esattezza che in precedenza. In base a questi calcoli e a metodi ancora più accurati di quello della parallasse, si sa oggi che la distanza media del sole dalla terra è approssimativamente di 149 milioni 600 mila chilometri, con un'approssimazione di qualche migliaio di chilometri. (In realtà tale distanza varia tra 147 milioni di chilometri e 152 milioni di chilometri, poiché l'orbita della terra è ellittica.)

Questa distanza media costituisce l'unità astronomica (U.A.) ed è in base a essa che si esprimono le altre distanze nel sistema solare. Saturno, per esempio, è risultato distante in media 1427 milioni di chilometri dal sole, ovvero 9,54 U.A.; con la scoperta dei pianeti esterni - Urano, Nettuno e Plutone - le frontiere del sistema solare si sono ulteriormente dilatate. L'asse maggiore dell'orbita di Plutone è di 11750 milioni di chilometri, ossia 79 U.A.; e si sa di alcune comete che si allontanano a distanze ancora maggiori dal sole.

Nel 1830 si sapeva ormai che il sistema solare si estendeva per miliardi di chilometri nello spazio, ma era evidente che questa non era assolutamente la dimensione dell'intero universo: vi erano ancora le stelle.

LE STELLE PIÙ LONTANE.

Naturalmente le stelle potrebbero davvero essere dei minuscoli oggetti incastonati nella volta solida del cielo, che costituirebbe la frontiera dell'universo, appena al di là dei limiti del sistema solare. Questa concezione rappresentò un punto di vista abbastanza rispettabile fino al 1700 circa, anche se alcuni studiosi non la condividevano.

Già nel 1440 uno studioso tedesco, Nicola Cusano, sosteneva che lo spazio era infinito e che le stelle erano dei soli disseminati a grandi distanze, illimitatamente, in tutte le direzioni, ciascuno con il proprio corteggio di pianeti abitati. Egli attribuiva alla grande distanza il fatto che le stelle non avevano lo stesso aspetto del sole, ma apparivano come piccole macchie luminose; purtroppo Nicola Cusano non aveva prove da addurre per sostenere le sue idee, che avanzava come semplici opinioni. Esse apparvero avventate e il loro autore venne ignorato.

Fu nel 1718 che l'astronomo inglese Edmund Halley, il quale stava lavorando intensamente per determinare al telescopio le posizioni esatte di varie stelle, trovò che tre delle stelle più brillanti - Sirio, Procione e Arturo - non si trovavano nelle posizioni tramandate dai greci. La differenza era troppo grande per essere un semplice errore, anche tenendo conto del fatto che le osservazioni degli astronomi greci erano necessariamente effettuate a occhio nudo. Halley giunse alla conclusione che le stelle, malgrado tutto, non sono fisse nel firmamento, ma si muovono liberamente, come api in uno sciame. Il loro moto è assai lento, ed era così poco visibile prima che le si potesse osservare al telescopio, che esse erano "apparse" fisse nel cielo.

La ragione per cui questo "moto proprio" delle stelle è tanto piccolo sta nella loro enorme distanza da noi. Sirio, Procione e Arturo sono tra le stelle più vicine, così che il loro moto proprio finì per essere osservato. È la loro relativa vicinanza rispetto a noi che le fa apparire così luminose. Le stelle meno luminose sono, in generale, più lontane, e il loro moto proprio è rimasto inosservabile anche nel corso di un lasso di tempo come quello che ci separa dagli antichi greci.

Il moto proprio in se stesso, pur essendo un indizio della distanza delle stelle, non consentiva di calcolare tale distanza. Naturalmente le stelle più vicine dovevano presentare una parallasse rispetto a quelle più lontane; eppure, non era possibile osservarla. Anche quando gli astronomi presero come linea di base l'asse maggiore dell'orbita della terra intorno al sole (299 milioni di chilometri), osservando le stelle dalle opposte estremità dell'orbita a intervalli di sei mesi, non riuscirono a scorgere alcuna parallasse. Quindi anche le stelle più vicine dovevano essere terribilmente lontane. Quando si vide che neppure telescopi sempre più perfezionati riuscivano a mostrare una parallasse stellare, si dovette aumentare progressivamente il valore stimato della distanza delle stelle. Il fatto che fossero perfettamente visibili a queste grandissime distanze rendeva evidente che dovevano essere delle immense palle di fuoco, simili al nostro sole. Nicola Cusano aveva dunque ragione.

Ma i telescopi e gli altri strumenti continuavano a progredire. Negli anni trenta del diciannovesimo secolo l'astronomo tedesco Friedrich Wilhelm Bessel fece uso di un'apparecchiatura inventata da poco, l'"eliometro", così chiamato perché originariamente doveva servire a misurare il diametro del sole con grande precisione. Lo si poteva usare altrettanto bene per misurare altre distanze in cielo, e Bessel lo usò per misurare la distanza tra due stelle. Osservando di quanto mutava la loro distanza di mese in mese, Bessel alla fine riuscì a misurare la parallasse di una stella. Scelse una piccola stella della costellazione del Cigno, chiamata 61 Cygni. La ragione della sua scelta fu che essa presentava di anno in anno un moto proprio insolitamente grande rispetto allo sfondo costituito dalle altre stelle, il che faceva supporre che si trovasse più vicina delle altre. (Non si confonda, però, questo moto proprio continuo con lo spostamento avanti e indietro rispetto allo sfondo che indica la parallasse.) Bessel prese nota con grande precisione delle posizioni successive di 61 Cygni rispetto alle stelle «fisse» circostanti (presumibilmente molto più lontane) e seguitò a fare queste osservazioni per più di un anno. Poi, nel 1838, fu in grado di affermare che 61 Cygni aveva una parallasse di 0,31 secondi di arco - la larghezza di una moneta vista da una distanza di 16 chilometri!

Questa parallasse, osservata prendendo come linea di base il diametro dell'orbita terrestre, significava che 61 Cygni si trovava a una distanza di circa 100 trilioni [1 con 14 zeri] di chilometri - 9000 volte l'ampiezza del nostro sistema solare. Pertanto il sistema solare, in confronto alla distanza delle stelle più vicine, si riduce a un punto insignificante nello spazio.

È abbastanza scomodo aver a che fare con numeri come i trilioni, e così gli astronomi hanno deciso di ridurli, esprimendo le distanze tramite la velocità della luce, che è di 300 mila chilometri al secondo. In un anno, la luce percorre qualcosa come 9,46 trilioni di chilometri: tale distanza viene pertanto chiamata anno luce. In termini di quest'unità, la stella 61 Cygni è distante circa 11 anni luce.

Due mesi dopo il successo di Bessel, l'astronomo inglese Thomas Henderson annunciò di aver trovato la distanza della stella Alpha Centauri (perdendo così l'onore della priorità per soli due mesi!). Alpha Centauri è una stella dell'emisfero meridionale, che non risulta visibile a latitudini superiori al 28° parallelo nord, ed è la terza stella del cielo come luminosità. È risultato che essa ha una parallasse di 0,75 secondi di arco, più di due volte quella di 61 Cygni, e che quindi è di altrettanto più vicina a noi. In effetti Alpha Centauri dista solo 4,3 anni luce dal sistema solare ed è la stella più vicina. In realtà non è neppure una singola stella, ma l'insieme di tre stelle molto ravvicinate.

Nel 1840 l'astronomo russo di origine tedesca Friedrich Wilhelm von Struve comunicò la parallasse di Vega, la quarta stella del cielo in ordine di luminosità. Risultò poi che vi era un leggero errore in questa determinazione, fatto però comprensibile, visto che la parallasse di Vega è estremamente piccola e la sua distanza considerevole - 27 anni luce.

Nel 1900 erano una settantina le stelle di cui erano state determinate le distanze con il metodo della parallasse, e attualmente sono molte migliaia. Un centinaio di anni luce costituisce all'incirca il limite della distanza misurabile con una certa precisione, anche con gli strumenti migliori. E innumerevoli stelle si trovano a distanze molto superiori.

A occhio nudo siamo in grado di vedere circa 6000 stelle. L'invenzione del telescopio fece capire di colpo che esse non erano che una piccolissima parte dell'universo. Quando Galileo puntò il suo telescopio verso i cieli, nel 1609, non solo scoprì nuove stelle, prima invisibili, ma rimase ancora più stupefatto quando volse lo strumento in direzione della Via Lattea. Essa, guardata a occhio nudo, non è che una striscia luminosa dal contorno indistinto, ma divenne improvvisamente, attraverso la lente del telescopio, un insieme di miriadi di stelle, innumerevoli come i granelli della polvere di talco.

Il primo uomo che tentò di spiegare tutto ciò fu l'astronomo inglese di origine tedesca William Herschel. Nel 1785 egli, in base alle sue osservazioni, pensò che le stelle in cielo fossero raggruppate in una configurazione a forma di lente. Se guardiamo verso la Via Lattea, vediamo un gran numero di stelle, ma se invece volgiamo lo sguardo in direzione perpendicolare ad essa, le stelle che scorgiamo sono relativamente poche. Herschel ne dedusse che i corpi celesti formavano un sistema appiattito, con l'asse più lungo nella direzione della Via Lattea. Oggi sappiamo che, entro certi limiti, Herschel aveva ragione, e chiamiamo il nostro sistema di stelle "galassia", termine che, secondo l'etimologia greca, altro non è che un sinonimo di Via Lattea.

Herschel cercò di stimare le dimensioni della galassia: suppose che tutte le stelle avessero circa la stessa luminosità intrinseca, il che permetteva di valutare la distanza relativa delle diverse stelle in funzione della loro luminosità. (Una ben nota legge dice che la luminosità diminuisce con il quadrato della distanza: pertanto, se la luminosità della stella A è un nono di quella della stella B, A deve essere a una distanza tripla di quella di B.)

Contando le stelle situate in diverse aree campione della Via Lattea, Herschel stimò che nella galassia vi fossero complessivamente circa 100 milioni di stelle. Dalla distribuzione delle loro luminosità Herschel dedusse che il diametro della galassia fosse 850 volte la distanza della splendente stella Sirio, e il suo spessore 155 volte.

Oggi sappiamo che la distanza di Sirio è di 8,8 anni luce; pertanto la stima di Herschel darebbe un diametro della galassia di 7500 anni luce e un suo spessore di 1300 anni luce, stima che è risultata di gran lunga troppo riduttiva; ma, come quella ultraprudente fatta da Aristarco a proposito della distanza del sole, era pur sempre un passo avanti nella direzione giusta.

Era naturale pensare che le stelle si muovessero in cielo come api in uno sciame (come ho già detto), ed Herschel mostrò che anche lo stesso sole partecipava a tale moto.

Nel 1805 Herschel scoprì, dopo aver dedicato venti anni della sua vita a determinare i moti propri del maggior numero possibile di stelle, che esisteva una zona del cielo in cui le stelle generalmente sembravano sbucare da un punto particolare (l'"apice"), mentre, in una zona del cielo opposta alla prima, le stelle perlopiù sembravano dirigersi verso un altro punto, detto "antiapice".

La spiegazione più semplice di questo fenomeno consisteva nel supporre che il sole si allontanasse dall'antiapice dirigendosi verso l'apice, e che per questo i gruppi di stelle dessero l'impressione di diradarsi dalla parte verso la quale il sole si muoveva, e sembrassero invece addensarsi dalla parte opposta. (Questo è un normale effetto creato dalla prospettiva, che potremmo verificare camminando in un bosco; ma solitamente vi siamo tanto abituati, che non lo notiamo neppure.)

Il sole non è dunque il centro immobile dell'universo, come Copernico aveva pensato, bensì si muove - ma non come avevano creduto i greci.

Non si muove intorno alla terra, ma trascina con sé la terra e tutti i pianeti mentre si sposta nella galassia. Le moderne misurazioni mostrano che il sole si muove (rispetto alle stelle più vicine) dirigendosi verso un punto situato nella costellazione della Lira, alla velocità di 19,3 chilometri al secondo.

A partire dal 1906 l'astronomo olandese Jacobus Cornelis Kapteyn condusse un'altra osservazione sistematica della Via Lattea. Potendo ormai disporre della fotografia e conoscendo la distanza reale delle stelle più vicine, egli riuscì a ottenere una stima migliore di quella fatta da Herschel. Kapteyn stabilì che le dimensioni della galassia erano di 23 mila anni luce per 6000; il modello della galassia proposto da Kapteyn aveva quindi un'ampiezza tripla e uno spessore quintuplo rispetto al modello di Herschel; ma era ancora troppo poco.

Per concludere, attorno al 1900 la situazione per quanto riguarda le distanze stellari era la stessa di quella che nel 1700 vigeva per le distanze dei pianeti. Infatti nel 1700 si conosceva la distanza della luna, ma quella dei pianeti più distanti poteva venir solo congetturata. Nel 1900 si conosceva la distanza delle stelle più vicine, ma quella delle stelle più lontane, ancora una volta, poteva solo essere congetturata.

MISURAZIONE DELLA LUMINOSITÀ DI UNA STELLA.

Il successivo passo importante fu la scoperta di un nuovo metodo di misura delle distanze, che si avvaleva di alcune stelle la cui luminosità era variabile. Questo capitolo dell'astronomia comincia con una stella molto luminosa, Delta Cephei, nella costellazione di Cefeo.

Uno studio approfondito mostrò che la sua luminosità aveva un ciclo di variabilità: dallo stadio di minima luminosità la stella passava in poco tempo a una luminosità doppia, per poi lentamente oscurarsi fino a tornare allo stato iniziale; questo ciclo si ripeteva di continuo, con la massima regolarità. Gli astronomi trovarono molte altre stelle che si comportavano in questo modo e le chiamarono, in onore di Delta Cephei, "variabili cefeidi", o semplicemente cefeidi.

I periodi delle cefeidi (cioè gli intervalli di tempo tra un minimo di luminosità e il successivo) variano da meno di un giorno a quasi due mesi. Sembra che quelle più vicine al nostro sole abbiano un periodo intorno a una settimana. Il periodo di Delta Cephei è di 5,3 giorni, mentre la cefeide più vicina di tutte (la Stella Polare, niente di meno) ha un periodo di 4 giorni. (Tuttavia, la Stella Polare presenta solo una modesta variazione di luminosità, non osservabile a occhio nudo.)

Le cefeidi sono importanti per gli astronomi per una ragione che richiede una breve digressione.

Fin dai tempi di Ipparco si misurava la luminosità di una stella tramite un parametro chiamato "magnitudine", secondo un sistema ideato dallo stesso Ipparco: più una stella è luminosa, minore è la magnitudine. Ipparco definì le venti stelle più luminose come stelle di prima

magnitudine (o di prima grandezza), mentre quelle un po' più deboli le chiamò di seconda magnitudine; seguivano la terza, la quarta e la quinta, fino alle stelle più deboli, quelle appena visibili, che erano di sesta magnitudine.

Nei tempi moderni - nel 1856, per l'esattezza - il concetto introdotto da Ipparco fu trasformato in un concetto quantitativo per merito dell'astronomo Norman Robert Pogson, il quale mostrò che la stella media di prima magnitudine era circa 100 volte più luminosa della stella media di sesta magnitudine. Se si stabilisce che un intervallo di cinque magnitudini equivale a un rapporto di 100 in luminosità, il rapporto per 1 magnitudine deve essere pari a 2,512. Una stella di magnitudine 4 è quindi 2,512 volte più luminosa di una stella di magnitudine 5 e 2,512 moltiplicato per 2,512 volte, cioè circa 6,3 volte, più luminosa di una stella di magnitudine 6.

Tra le stelle, 61 Cygni è una stella debole con una magnitudine 5,0 (i moderni metodi astronomici consentono di valutare il decimo e in qualche caso perfino il centesimo di magnitudine). Capella è una stella luminosa, con una magnitudine di 0,9, mentre Alpha Centauri è ancora più luminosa, con una magnitudine di 0,1. E la misurazione procede fino a luminosità ancora superiori, che sono designate come magnitudine zero, oltre la quale si ricorre ai numeri negativi. Sirio, la stella più luminosa del cielo, ha una magnitudine di meno 1,42; il pianeta Venere raggiunge la magnitudine di meno 4,2, la luna piena di meno 12,7, il sole di meno 26,9.

Queste sono le "magnitudini apparenti" delle stelle, così come le vediamo - non già le loro "luminosità" assolute, indipendenti dalla distanza. Ma se conosciamo la distanza di una stella e la sua magnitudine apparente, possiamo calcolare la sua luminosità reale. Gli astronomi basano la scala delle "magnitudini assolute" sulla luminosità a una distanza standard, che è stata stabilita pari a dieci parsec, ossia 32,6 anni luce. (Il "parsec" è la distanza a cui una stella presenta una parallasse di 1 secondo di arco, ed è pari a poco più di 30 trilioni di chilometri, ossia a 3,26 anni luce.)

Anche se Capella appare meno brillante di Alpha Centauri e di Sirio, in realtà è un'emittente di luce assai più potente di loro; solo che si trova molto più lontana. Se fossero tutte e tre alla distanza standard Capella sarebbe di gran lunga la più luminosa. La sua magnitudine assoluta è meno 0,1, mentre quelle di Sirio e di Alpha Centauri sono rispettivamente 1,3 e 4,8. Il nostro sole ha una luminosità che eguaglia appena quella di Alpha Centauri, con la sua magnitudine assoluta di 4,86. Non è che una comune stella, di media grandezza.

Torniamo alle cefeidi. Nel 1912 Henrietta Leavitt, un'astronoma dell'Osservatorio di Harvard, stava studiando la più piccola delle nubi di Magellano - due enormi sistemi stellari nell'emisfero australe che prendono il nome dal celebre navigatore, perché furono osservate per la prima volta durante la sua circumnavigazione del globo. Tra le stelle della piccola nube di Magellano, Henrietta Leavitt scoprì venticinque cefeidi, di ciascuna delle quali registrò il periodo di variazione, trovando, con sua stessa sorpresa, che più il periodo era lungo, più la stella era luminosa.

Dato che questo non si verifica per le variabili cefeidi più prossime a noi, perché dovrebbe verificarsi nella piccola nube di Magellano?

Nei nostri dintorni conosciamo soltanto le magnitudini apparenti delle cefeidi; non conoscendo né la loro distanza né la loro luminosità assoluta, non abbiamo modo di stabilire una relazione tra il periodo di una stella e la sua luminosità. Invece, nella piccola nube di Magellano, tutte le stelle sono in pratica circa alla stessa distanza da noi, data la grande lontananza della nube. È come se una persona a New York volesse calcolare la propria distanza da ogni persona che si trova a Chicago: arriverebbe alla conclusione che tutti gli abitanti di Chicago hanno circa la stessa distanza da lei, dato che qualche chilometro su più di mille non fa differenza. Analogamente, una stella che si trovi all'estremità più lontana della nube non è significativamente più lontana di una stella che si trovi all'estremità più vicina.

Nel caso delle stelle della piccola nube di Magellano, quindi, si potrebbe prendere la loro magnitudine apparente come misura relativa della loro magnitudine assoluta. Così la Leavitt poté considerare come reale la relazione rilevata: cioè, il periodo delle variabili cefeidi aumenta

regolarmente con l'aumentare della magnitudine assoluta. Fu così possibile stabilire una curva "periodo-luminosità" - un grafico che mostra quale periodo debba avere una cefeide di una data magnitudine assoluta, e, reciprocamente, quale magnitudine assoluta debba avere una cefeide di un dato periodo.

Nell'ipotesi che le cefeidi di tutto l'universo si comportino come quelle della piccola nube di Magellano (assunzione ragionevole), gli astronomi disporrebbero di una scala "relativa" per misurare le distanze, almeno fin dove è possibile scorgere le cefeidi con i telescopi migliori. Osservate due cefeidi aventi periodo uguale, si potrebbe supporre l'uguaglianza delle loro magnitudini assolute. Se, per esempio, la cefeide A apparisse quattro volte più luminosa della cefeide B, quest'ultima avrebbe una distanza doppia da noi; in questo modo sarebbe possibile riportare in un grafico in scala le distanze relative delle cefeidi osservabili. Pertanto, se si potesse determinare la distanza effettiva anche di una sola di queste cefeidi, diverrebbero note le distanze di tutte le altre.

Sfortunatamente, anche la più vicina delle cefeidi, la Stella Polare, si trova a centinaia di anni luce da noi, di gran lunga troppo lontana per poterne misurare la distanza in base alla parallasse. Gli astronomi dovettero ricorrere a metodi meno diretti: un indizio utilizzabile veniva dal moto proprio, perché, in media, più una stella è distante, minore è il suo moto proprio. (Si rammenti che Bessel aveva stabilito che 61 Cygni era relativamente vicina perché aveva un grande moto proprio.) Sono stati usati vari sistemi per determinare il moto proprio di gruppi di stelle, con l'aiuto di metodi statistici.

Era una procedura complicata, ma i risultati fornirono la distanza approssimativa di vari gruppi di stelle che contenevano delle cefeidi. Dalle distanze e dalle magnitudini apparenti di queste ultime, si poterono determinare le magnitudini assolute, confrontandole poi con i periodi.

Nel 1913 l'astronomo danese Ejnar Hertzsprung stabilì che una cefeide di magnitudine assoluta meno 2,3 aveva un periodo di 6,6 giorni. In base a questo risultato e usando la curva periodo-luminosità della Leavitt, egli riuscì a determinare la magnitudine assoluta di tutte le cefeidi. (Incidentalmente, risultò che in genere esse sono stelle grandi e luminose, molto più luminose del nostro sole. La loro variazione di luminosità è probabilmente dovuta alle loro pulsazioni: sembra che queste stelle si espandano e si contraggano in continuazione, quasi respirassero, inspirando ed espirando profondamente.)

Pochi anni dopo, l'astronomo americano Harlow Shapley ripeté la ricerca e arrivò alla conclusione che una cefeide di magnitudine assoluta meno 2,3 aveva un periodo di 5,96 giorni. L'accordo era sufficiente per consentire agli astronomi di procedere: ormai avevano il loro metro.

DETERMINAZIONE DELLE DIMENSIONI DELLA GALASSIA.

Nel 1918 Shapley cominciò a osservare le cefeidi della nostra galassia, nel tentativo di determinare con questo nuovo metodo le dimensioni della galassia stessa. Egli si occupò in modo particolare delle cefeidi che si trovano in gruppi di stelle che vengono chiamati ammassi globulari - aggregati sferici molto densi che possono contenere da decine di migliaia a decine di milioni di stelle, con diametri dell'ordine di 100 anni luce.

Questi ammassi (di cui già Herschel, un secolo prima, aveva osservato l'esistenza) presentano un ambiente astronomico del tutto diverso da quello che prevale nello spazio più prossimo a noi. Al centro degli ammassi più grossi le stelle sono fittamente disposte con una densità di 500 ogni 10 parsec cubi, in confronto alla densità dei nostri dintorni, che è di 1 stella ogni 10 parsec cubi. In queste condizioni la luce stellare deve superare di molto quella prodotta dalla luna sulla terra, così che un ipotetico pianeta che si trovasse vicino al centro di un simile ammasso non conoscerebbe una vera notte. Esistono circa 100 ammassi globulari noti nella nostra galassia e probabilmente altrettanti che non sono stati ancora scoperti. Shapley calcolò che la distanza dei vari ammassi globulari fosse compresa tra 20 mila e 200 mila anni luce da noi. (L'ammasso più vicino,

come la stella più vicina, si trova nella costellazione del Centauro ed è visibile a occhio nudo, apparendo simile a una stella: esso porta il nome di Omega Centauri. L'ammasso più distante, N.G.C. 2419, è talmente lontano che forse non lo si può neppure considerare come appartenente alla galassia.)

Shapley trovò che gli ammassi erano distribuiti in una enorme sfera tagliata a metà dal piano della Via Lattea; essi formavano una sorta di alone intorno a una porzione del corpo principale della galassia. Shapley formulò l'assunto abbastanza naturale che essi circondassero il centro della galassia; secondo i suoi calcoli, il punto centrale di questo alone di ammassi globulari si trova entro la Via Lattea, in direzione della costellazione del Sagittario, a circa 50 mila anni luce da noi. Ne consegue che il nostro sistema solare, ben lungi dall'essere al centro della galassia, come avevano pensato Herschel e Kapteyn, si troverebbe nelle vicinanze dei suoi margini.

Il modello di Shapley raffigurava la galassia come un'immensa lente, del diametro di circa 300 mila anni luce. Questa volta l'errore era in eccesso, come mostrò ben presto un altro metodo di misurazione.

Dal fatto che la galassia ha la forma di un disco, gli astronomi, dopo William Herschel, dedussero che essa ruotasse nello spazio. Nel 1926 l'astronomo olandese Jan Oort si accinse a misurare tale rotazione.

Dato che la galassia non è un oggetto solido, ma è composta da un gran numero di singole stelle, non c'è da aspettarsi che essa giri in modo rigido, come farebbe una ruota. Le stelle situate in prossimità del centro gravitazionale del disco devono ruotare intorno a esso più rapidamente di quelle più distanti (come i pianeti più vicini al sole percorrono le loro orbite con velocità maggiore). Pertanto le stelle vicine al centro della galassia (cioè in direzione del Sagittario) dovrebbero tendere a precedere il nostro sole, mentre quelle più distanti di noi dal centro (in direzione dei Gemelli) dovrebbero tendere a restare indietro durante la loro rivoluzione. Inoltre, più una stella dista da noi, maggiore dovrebbe essere questa differenza di velocità.

In base a questi assunti, divenne possibile calcolare la velocità di rotazione intorno al centro della galassia, partendo dal moto relativo delle stelle. Si trovò che il sole e le stelle vicine viaggiano a circa 240 chilometri al secondo rispetto al centro galattico, compiendo una rivoluzione completa intorno a esso in circa 200 milioni di anni. (Il sole percorre un'orbita quasi circolare, mentre le orbite di certe stelle, come per esempio Arturo, sono decisamente ellittiche.

Il fatto che le stelle non ruotino in orbite perfettamente parallele spiega il moto relativo del sole in direzione della costellazione della Lira.)

Avendo fatto una stima della velocità di rotazione, gli astronomi poterono successivamente calcolare l'intensità del campo gravitazionale del centro galattico, e quindi la sua massa. Si è trovato che il centro galattico (che contiene la maggior parte della massa della galassia) ha una massa pari a più di 100 miliardi di volte quella del nostro sole. E dato che quest'ultimo è una stella con una massa superiore alla media, la nostra galassia contiene forse da 200 a 300 miliardi di stelle - fino a tremila volte il numero stimato da Herschel.

Dalla curvatura delle orbite descritte dalle stelle è inoltre possibile determinare la posizione del centro intorno a cui ruotano. In tal modo si è potuto confermare che il centro della galassia si trova in direzione del Sagittario, come aveva concluso Shapley, ma solo a 27 mila anni luce da noi, e il diametro totale della galassia diventa così di 100 mila anni luce, anziché 300 mila. In questo nuovo modello, che oggi viene ritenuto corretto, lo spessore del disco al centro è di circa 20 mila anni luce e diminuisce verso la periferia; nella posizione in cui si trova il nostro sole, cioè a due terzi del raggio in direzione della periferia, lo spessore del disco è all'incirca di 3000 anni luce. Ma si tratta solo di cifre approssimative, perché la galassia non ha frontiere nettamente definite

Se il sole è tanto vicino all'orlo della galassia, perché la Via Lattea non è molto più luminosa in direzione del centro che nella direzione opposta, cioè verso il bordo? Guardando verso il Sagittario noi abbiamo di fronte il corpo principale della galassia, con circa 200 miliardi di stelle, mentre verso la periferia ve ne sono soltanto alcuni milioni, assai più disperse. Eppure la fascia

della Via Lattea ci appare ugualmente luminosa in tutte le direzioni. La spiegazione sembra risiedere nel fatto che enormi nubi di polvere oscura nascondono alla nostra vista gran parte della zona centrale della galassia; queste nubi di polvere e gas possono arrivare a costituire addirittura una metà della massa della periferia galattica.

Probabilmente noi non vediamo più di 1 su 10 mila della luce del centro galattico, a dir molto.

È per questa ragione che Herschel e altri tra i primi studiosi della galassia avevano pensato che il nostro sistema solare fosse al centro ed è, probabilmente per lo stesso motivo, che Shapley in origine aveva sopravvalutato la grandezza della galassia. Alcuni degli ammassi da lui studiati erano oscurati dalla polvere interposta, e pertanto le cefeidi in essi contenute sembravano meno luminose di quanto in realtà fossero, e quindi più distanti.

L'UNIVERSO SI INGRANDISCE.

Ancor prima che fossero determinate la massa e la grandezza della galassia, le variabili cefeidi delle nubi di Magellano (in cui la Leavitt aveva fatto la scoperta cruciale della curva luminosità-periodo) furono usate per determinare la distanza delle nubi stesse, che risultò superiore ai 100 mila anni luce. I calcoli attuali più attendibili pongono la grande nube di Magellano a una distanza da noi di circa 150 mila anni luce e la piccola nube di Magellano a 170 mila anni luce. La grande nube ha un diametro che non supera la metà di quello della nostra galassia, mentre quello della piccola nube non supera un quinto. Inoltre esse appaiono meno densamente popolate di stelle. La grande nube di Magellano contiene 5 miliardi di stelle (solo 1 su 20, o ancor meno, del numero di stelle della nostra galassia), mentre la piccola nube di Magellano ne ha solo 1,5 miliardi.

Questa era la situazione all'inizio degli anni venti: l'universo noto aveva un diametro di meno di 200 mila anni luce, ed era formato dalla nostra galassia e dalle sue due vicine. Ci si cominciò allora a domandare se, al di fuori di questo, esistesse qualche altra cosa.

I sospetti si concentravano su certe piccole macchie di nebbia luminosa, chiamate "nebulose", osservate da tempo dagli astronomi.

L'astronomo francese Charles Messier ne aveva catalogate 103 nel 1781. (Molte di esse sono ancor oggi chiamate con il numero dato loro da Messier, preceduto dalla lettera M, iniziale del suo nome.)

Erano solo delle nuvole come apparivano, queste nebulosità? Alcune sembravano non essere altro, come la nebulosa di Orione (scoperta nel 1656 dall'astronomo olandese Christiaan Huygens), una nube di polvere e gas, di massa pari a 500 volte quella del nostro sole, illuminata da stelle molto calde al suo interno. Altre nebulosità, invece, risultarono essere ammassi globulari - enormi aggregati di stelle.

Restavano, però, delle macchie luminose che non sembravano contenere affatto delle stelle. Ma allora perché erano luminose? Nel 1845 l'astronomo britannico William Parsons (terzo conte di Rosse), usando un telescopio da 72 pollici costruito con il lavoro di un'intera vita, aveva accertato che alcune di queste macchie avevano una struttura a spirale, il che procurò loro il nome di «nebulose a spirale», senza tuttavia chiarire il mistero della loro luminosità.

La più spettacolare di queste macchie, nota come M 31, o nebulosa di Andromeda (perché si trova nella costellazione di Andromeda), era stata studiata per la prima volta nel 1612 dall'astronomo tedesco Simone Marius. Si tratta di un ovale allungato di luce fioca, grande metà della luna piena. Poteva darsi che essa fosse composta di stelle talmente lontane che non era possibile vederle distinte, neppure con un grande telescopio? In tal caso, la nebulosa di Andromeda doveva trovarsi lontanissima da noi, ma doveva anche avere dimensioni enormi per essere visibile a una simile distanza. (Già nel 1755 il filosofo tedesco Immanuel Kant aveva speculato sull'esistenza di siffatti lontanissimi raggruppamenti di stelle, che aveva denominato "universi-isola".)

Nel secondo decennio del ventesimo secolo vi fu un acceso dibattito su tale questione. L'astronomo olandese-americano Adriaan Van Maanen aveva riferito che la nebulosa di Andromeda ruotava con una velocità misurabile, e che doveva quindi trovarsi abbastanza vicina a noi. Se infatti si fosse trovata al di fuori della galassia, sarebbe stata troppo lontana perché ci fosse possibile percepirne il moto. Shapley, un buon amico di Van Maanen, usò le scoperte di questi per sostenere che la nebulosa di Andromeda faceva parte della galassia.

Contro questa affermazione si levò l'astronomo americano Heber Doust Curtis, sostenendo che, anche se la nebulosa di Andromeda non era risolvibile in stelle, di quando in quando faceva la sua comparsa la luce debolissima di una stella; secondo Curtis si trattava di una "nova", una stella che aumenta di colpo la sua luminosità di migliaia di volte. Nella nostra galassia queste stelle acquistano un'enorme luminosità per breve tempo, per poi scomparire di nuovo alla vista; ma nella nebulosa di Andromeda esse risultavano a malapena visibili, anche al massimo del loro splendore. Curtis argomentò che le novae apparivano così fievoli perché la nebulosa di Andromeda era straordinariamente lontana. Quanto alle stelle normali di tale nebulosa, esse erano decisamente troppo deboli per essere avvistate, e la loro luce si fondeva in una sorta di nebbia vagamente luminosa.

Il 26 aprile 1920 Curtis e Shapley tennero sull'argomento un dibattito che ebbe ampia risonanza; in complesso non si giunse a nulla di nuovo, anche se Curtis risultò un oratore sorprendentemente abile nel difendere accanitamente la propria posizione.

Nel giro di qualche anno, tuttavia, fu evidente che era Curtis ad avere ragione. In primo luogo i dati di Van Maanen risultarono sbagliati. Non se ne sa bene la ragione, ma anche i più bravi possono commettere degli errori, e a quanto pare ciò era accaduto a Van Maanen.

Poi, nel 1924, l'astronomo americano Edwin Powell Hubble puntò il telescopio da 100 pollici (2,5 metri) del Monte Wilson, in California, sulla nebulosa di Andromeda. (Questo telescopio fu chiamato Hooker, dal nome di John B. Hooker che aveva elargito i fondi per la sua costruzione.) Tale strumento potentissimo risolse in stelle alcune zone della periferia della nebulosa; si vide allora che la nebulosa di Andromeda, almeno in alcune sue parti, assomigliava alla Via Lattea; poteva dunque esserci qualcosa di vero nel concetto degli «universi-isola»

Tra le stelle alla periferia della nebulosa di Andromeda vi sono delle variabili cefeidi; usandole come «metro» di riferimento, Hubble stabilì che la nebulosa distava qualcosa come un milione di anni luce!

La nebulosa di Andromeda era dunque lontana, lontanissima, dalla nostra galassia. Tenuto conto di tale distanza, la sua dimensione apparente dimostrava che essa doveva essere un enorme agglomerato di stelle, paragonabile alla nostra galassia.

Anche altre nebulosità risultarono agglomerati di stelle, ancora più distanti della nebulosa di Andromeda. Si dovette riconoscere che tutte queste "nebulose extra-galattiche" erano delle galassie - dei nuovi universi che facevano del nostro niente più che uno dei tanti esistenti nello spazio. Ancora una volta l'universo si era ingrandito.

Era più vasto di quanto mai si fosse pensato - delle dimensioni non solo di centinaia di migliaia, ma forse di centinaia di milioni di anni luce.

GALASSIE A SPIRALE.

Per tutti gli anni trenta gli astronomi furono alle prese con parecchi difficili problemi relativi alle galassie. In primo luogo, in base alla loro presunta distanza, esse apparivano tutte molto più piccole della nostra. Sembrava una strana coincidenza che noi abitassimo nella galassia più grande esistente. In secondo luogo, gli ammassi globulari che circondavano la galassia di Andromeda apparivano dotati di una luminosità pari a circa la metà o a un terzo di quella degli ammassi della nostra galassia. (Andromeda è ricca di ammassi globulari più o meno quanto la nostra galassia, e i suoi ammassi sono disposti secondo una simmetria sferica intorno al suo centro; ciò sembra

dimostrare che l'assunto di Shapley che analoga fosse la disposizione dei nostri ammassi, era ragionevole. La galassia M 87, nella Vergine, ne possiede almeno mille.)

Il problema più grave era che le distanze delle galassie facevano pensare che l'universo avesse solo due miliardi di anni (in base a ragionamenti che esporrò più avanti in questo stesso capitolo). La cosa appariva sconcertante, perché già la terra veniva ritenuta dai geologi più vecchia di tale età, e ciò in base a prove che venivano considerate sommamente attendibili.

Si cominciò a intravedere una risposta durante la seconda guerra mondiale, allorché l'astronomo americano di origine tedesca Walter Baade scoprì che il «metro» usato per misurare le distanze delle galassie era sbagliato.

Nel 1942 Baade approfittò dell'oscuramento di Los Angeles dovuto alla guerra, oscuramento che eliminava dal cielo notturno di Monte Wilson le luci artificiali, per studiare in modo approfondito la galassia di Andromeda con il telescopio da 100 pollici. Con quella visibilità eccezionale, egli riuscì a osservare singolarmente alcune stelle situate nelle regioni più interne della galassia. Immediatamente notò alcune sorprendenti differenze tra queste stelle e quelle alla periferia della galassia. Le stelle più luminose della zona interna erano rossastre, mentre quelle alla periferia erano azzurre. Inoltre, le giganti rosse all'interno non erano altrettanto luminose delle giganti azzurre alla periferia; queste ultime avevano una luminosità fino a 100 mila volte quella del nostro sole, mentre le stelle rosse delle zone interne arrivavano soltanto a 1000 volte tale luminosità.

Infine, la periferia della galassia di Andromeda, dove apparivano le luminosissime giganti azzurre, era assai ricca di polvere, mentre la zona interna, con le sue stelle rosse meno luminose, ne era priva. Sembrò a Baade che vi fossero due gruppi di stelle aventi struttura e storia differenti. Egli chiamò le stelle azzurre all'esterno "popolazione prima" e quelle rosse dell'interno "popolazione seconda".

Risultò che le stelle di popolazione prima sono relativamente giovani, hanno un elevato contenuto metallico, e descrivono orbite quasi circolari intorno al centro galattico nel piano principale della galassia. Le stelle di popolazione seconda sono relativamente vecchie, hanno basso contenuto metallico e le loro orbite sono decisamente ellittiche e considerevolmente inclinate rispetto al piano della galassia. Entrambe le popolazioni, dopo la scoperta di Baade, sono state suddivise in sottogruppi minori.

Quando il nuovo telescopio Hale, da 200 pollici - 5 metri - (così chiamato in onore dell'astronomo americano George Ellery Hale, che ne diresse la costruzione), dopo la guerra fu installato sul Monte Palomar, Baade portò avanti le sue indagini. Trovò nella distribuzione delle due popolazioni alcune regolarità, che dipendevano dalla natura delle galassie in questione. Le galassie ellittiche (sistemi a forma di ellissoide, con una struttura interna quasi del tutto uniforme) apparivano costituite soprattutto di stelle della popolazione seconda, e così pure gli ammassi globulari di tutte le galassie. Invece nelle galassie a spirale (galassie munite di bracci, che ricordano una girandola), tali bracci erano composti di stelle di popolazione prima, disposte su uno sfondo di stelle di popolazione seconda.

Si ritiene che solo il 2 per cento circa delle stelle dell'universo siano di popolazione prima. Ma il nostro stesso sole e le stelle più note nelle nostre vicinanze rientrano in questa classe, fatto da cui possiamo dedurre che la nostra è una galassia a spirale, e che noi ci troviamo in un braccio della spirale. (Ecco il perché delle molte nubi di polvere, luminose o oscure, nelle nostre vicinanze: i bracci di una galassia a spirale sono molto ricchi di polvere.) Le fotografie mostrano che anche la galassia di Andromeda è del tipo a spirale.

E ora torniamo al «metro». Baade cominciò a confrontare le cefeidi situate negli ammassi globulari (popolazione seconda) con quelle nel nostro braccio della spirale (popolazione prima). Risultò che le cefeidi delle due popolazioni erano effettivamente di due tipi diversi, per quanto riguarda la relazione tra periodo e luminosità. Le cefeidi di popolazione seconda seguivano la curva luminosità-periodo stabilita dalla Leavitt e da Shapley. Avvalendosi di tale «metro», Shapley aveva valutato le distanze degli ammassi globulari e le dimensioni della nostra galassia con ragionevole

precisione. Ora, però, si veniva a scoprire che le cefeidi di popolazione prima costituivano un «metro» totalmente diverso. Una cefeide di popolazione prima aveva una luminosità quadrupla o quintupla di una cefeide di popolazione seconda avente lo stesso periodo. Pertanto l'uso della scala della Leavitt doveva necessariamente portare a un calcolo errato della magnitudine assoluta di una cefeide di popolazione prima in base al suo periodo. E se era sbagliata la magnitudine assoluta, doveva esserlo anche la distanza calcolata in base a essa: nella realtà la stella doveva essere molto più distante di quanto risultava da tali calcoli.

Hubble aveva valutato la distanza della galassia di Andromeda servendosi delle cefeidi (di popolazione prima) della periferia - le uniche che i telescopi di quel tempo riuscivano a far vedere. Ora, con il nuovo «metro», la galassia risultava distante circa 2,5 milioni di anni luce, anziché meno di un milione. (La galassia di Andromeda resta, tuttavia, una nostra vicina: si stima infatti che la distanza media tra le galassie si aggiri sui venti milioni di anni luce.)

Le dimensioni dell'universo noto erano così più che raddoppiate in un sol colpo e i problemi su cui ci si era arrovellati negli anni trenta erano risolti. La nostra galassia non era più la maggiore di tutte: c'era la galassia di Andromeda, per esempio, che aveva una massa decisamente superiore. In secondo luogo, era ora evidente che gli ammassi globulari della galassia di Andromeda erano altrettanto luminosi dei nostri: se era sembrato il contrario, ciò era dovuto all'erronea valutazione della loro distanza. Infine, per ragioni che spiegherò più avanti, la nuova scala delle distanze consentiva di ritenere l'universo molto più vecchio, rendendo la sua età compatibile con quella attribuita dai geologi alla terra.

AMMASSI DI GALASSIE.

Raddoppiando la distanza delle galassie non si risolve il problema delle dimensioni dell'universo. Resta da considerare la possibilità di sistemi ancora più grandi - di ammassi di galassie e di superammassi. E, infatti, i moderni telescopi hanno dimostrato l'esistenza di ammassi di galassie; per esempio nella costellazione della Chioma di Berenice (Coma) si trova un grande ammasso ellissoidale di galassie, del diametro di circa 8 milioni di anni luce. L'ammasso in Coma contiene circa 11 mila galassie, separate da una distanza media di soli 300 mila anni luce (contro una media di circa 3 milioni di anni luce tra le galassie nelle nostre vicinanze).

Sembra che la nostra galassia appartenga a un "gruppo locale" che include le nubi di Magellano, la galassia di Andromeda e tre piccole "galassie satelliti" molto vicine a quest'ultima, oltre ad alcune altre, per un totale di diciannove oggetti. Due di queste galassie, chiamate Maffei 1 e Maffei 2 (in onore di Paolo Maffei, l'astronomo italiano che per primo ne segnalò l'esistenza), furono scoperte solo nel 1971. Il ritardo di tale scoperta era dovuto al fatto che la loro osservazione è resa difficile dalle nubi di polvere interposte tra loro e noi.

Del gruppo locale, soltanto la nostra galassia, Andromeda e le due di Maffei sono galassie giganti, mentre le altre sono nane. Una delle nane, IC 1613, conterrà forse solo 60 milioni di stelle: non è dunque molto più di un grande ammasso globulare. Tra le galassie, come tra le stelle, le nane sono molto più numerose delle giganti.

Se le galassie formano degli ammassi e dei superammassi, ne dobbiamo dedurre che l'universo si estende indefinitamente e che lo spazio è infinito? Oppure esiste un qualche limite, sia per l'universo che per lo spazio? Ebbene, gli astronomi sono in grado di avvistare oggetti fino a 10 miliardi di anni luce di distanza stimata, dove, a quanto pare, incontrano un limite. Per spiegare perché, a questo punto devo spostare leggermente l'argomento del discorso: mentre finora ho parlato dello spazio, ora mi occuperò del tempo.

LA NASCITA DELL'UNIVERSO.

I creatori di miti hanno inventato molte versioni fantasiose della nascita dell'universo (di solito occupandosi soprattutto della terra e liquidando velocemente tutto il resto sotto la denominazione del «cielo» o «dei cieli»). In genere il tempo in cui sarebbe avvenuta la creazione non viene posto molto lontano nel passato (anche se si dovrebbe tener presente il fatto che, per gli uomini dell'epoca preletteraria, un periodo di mille anni era qualcosa di più impressionante di un miliardo di anni per noi oggi).

Il racconto della creazione più familiare per noi è naturalmente quello dei primi capitoli della "Genesi", secondo alcuni un adattamento di miti babilonesi, che ne avrebbe esaltato la bellezza poetica e la grandezza morale.

Sono stati fatti vari tentativi di calcolare la data della creazione in base ai riferimenti cronologici che compaiono nella Bibbia (i regni di vari re, il tempo trascorso dall'Esodo alla consacrazione del tempio di Salomone, le età dei patriarchi prima e dopo il Diluvio).

Gli studiosi ebrei del Medioevo fissarono la data della creazione nel 3760 avanti Cristo, e il calendario ebraico ancora oggi conta gli anni a partire da tale data. Nel 1658 dopo Cristo l'arcivescovo James Ussher della Chiesa anglicana calcolò che l'anno della creazione doveva essere stato il 4004 avanti Cristo; altri, seguendo la sua proposta, arrivarono a fissarla esattamente alle 8 pomeridiane del 22 ottobre di quell'anno. Alcuni teologi della Chiesa greca ortodossa retrodatarono la creazione fino al 5508 avanti Cristo.

Ancora nel diciottesimo secolo il mondo colto accettava la versione biblica e si riteneva che l'età dell'universo fosse al massimo di 6000 o 7000 anni. Tale convinzione ricevette il primo duro colpo nel 1795, quando uscì un libro intitolato "Theory of the Earth" (Teoria della terra), di cui era autore un naturalista scozzese, James Hutton.

Questi partiva dal presupposto che i lenti processi naturali che si verificano sulla superficie della terra (come la formazione delle montagne e l'erosione, l'escavazione dei letti dei fiumi e così via) siano avvenuti seguendo un ritmo costante nel corso della storia della terra. Questo principio, detto attualismo (o uniformismo), implicava che tali processi fossero stati all'opera per un tempo sorprendentemente lungo per arrivare a produrre i fenomeni osservati.

Pertanto la terra doveva avere non migliaia, ma molti milioni di anni.

Le idee di Hutton suscitarono un'immediata derisione. Ma erano un seme destinato a germogliare: all'inizio degli anni trenta del diciannovesimo secolo il geologo inglese Charles Lyell riaffermò le idee di Hutton e, in un'opera in tre volumi dal titolo "Principles of Geology" (Principi di geologia) presentò le prove con tale chiarezza e decisione da vincere le resistenze del mondo della scienza. Si può far coincidere la nascita della geologia moderna con l'uscita di quell'opera.

L'ETÀ DELLA TERRA.

Furono fatti dei tentativi di calcolare l'età della terra in base al principio uniformista. Per esempio, conoscendo la quantità di sedimento depositato per azione dell'acqua ogni anno (secondo una stima moderna è di circa tre centimetri e mezzo ogni secolo), si può calcolare l'età di uno strato di roccia sedimentaria in base al suo spessore. Fu ben presto evidente che con questo metodo non si sarebbe riusciti a determinare con esattezza l'età della terra, perché l'erosione, lo sgretolio, i sismi e le altre forze modificavano le condizioni della roccia. Purtuttavia, anche questi dati non del tutto attendibili indicavano che la terra doveva avere almeno 500 milioni di anni.

Un altro modo di misurare l'età della terra era quello di stimare il tasso di accumulazione del sale negli oceani, suggerimento che per primo aveva avanzato Edmund Halley già nel 1715. La concentrazione del sale, infatti, è aumentata di continuo, perché i fiumi hanno costantemente trasportato sale in mare, mentre era solo l'acqua a evaporare; se si parte dall'assunto che all'inizio gli oceani fossero costituiti di acqua dolce, il tempo necessario perché i fiumi cedessero al mare l'attuale contenuto salino (più del 3 per cento) poteva esser calcolato pari a un miliardo di anni.

Questo allungamento dei tempi andava molto bene per i biologi, che, nella seconda metà del diciannovesimo secolo, cercavano di ricostruire il lento sviluppo degli organismi viventi a partire da creature primordiali unicellulari, fino a giungere ai complessi animali superiori. Ai biologi occorrevano tempi straordinariamente lunghi per consentire un simile sviluppo, e un miliardo di anni poteva essere sufficiente.

Tuttavia, attorno alla metà del diciannovesimo secolo, sorsero delle improvvise complicazioni derivate da considerazioni astronomiche. Per esempio, il principio di "conservazione dell'energia" sollevava un problema interessante relativo al sole. Il sole, infatti, emette quantità colossali di energia, e così ha fatto per tutto il periodo di cui esiste documentazione storica. Se la terra esisteva da tempo immemorabile, da dove era venuta tutta questa energia? Non certo dalle fonti solitamente note. Se all'inizio il sole fosse stato carbone compatto che bruciava in un'atmosfera di ossigeno, si sarebbe convertito in anidride carbonica (al tasso con cui emette energia) nel giro di circa 2500 anni.

Il fisico tedesco Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, uno dei primi a enunciare il principio di conservazione dell'energia, si interessò in modo particolare al problema del sole. Nel 1854 egli fece osservare che, se il sole si fosse andato contraendo, la sua massa avrebbe acquistato energia avvicinandosi al centro di gravità, proprio come fa una pietra che cade. Tale energia avrebbe potuto essere convertita in radiazione. Helmholtz calcolò che una contrazione del sole non superiore a 1 su 10 mila del suo raggio gli avrebbe procurato una riserva di energia sufficiente per 2000 anni.

Il fisico britannico William Thomson (diventato poi Lord Kelvin) seguitò a lavorare sull'argomento, arrivando alla conclusione che, in base a questo ragionamento, la terra non poteva avere più di 50 milioni di anni. Infatti, il sole doveva essersi contratto - per emettere energia al ritmo dato - a partire da dimensioni enormi, che all'origine dovevano raggiungere l'orbita della terra. (Naturalmente una simile ipotesi richiedeva che Venere fosse più giovane della terra, e Mercurio ancora più giovane.) Lord Kelvin proseguì, calcolando che se la stessa terra all'inizio fosse stata una massa fusa, avrebbe avuto bisogno di circa 20 milioni di anni per raffreddarsi fino alla sua temperatura attuale, quindi questa doveva essere la sua età.

Nell'ultimo decennio del secolo scorso sembravano dunque esistere due schieramenti opposti, entrambi apparentemente invincibili. Mentre da una parte i fisici avevano dimostrato in modo definitivo che la terra non poteva essere solida da più di qualche milione di anni, i geologi e i biologi ritenevano di aver dimostrato in modo altrettanto definitivo che la terra doveva essere solida da non meno di un miliardo di anni.

Ma a questo punto venne fuori qualcosa di nuovo e di completamente inaspettato, e la tesi dei fisici cominciò a sgretolarsi. Nel 1896 la scoperta della radioattività rivelò che l'uranio e altre sostanze radioattive presenti nella terra liberavano grandi quantità di energia, e certamente ciò avveniva da lungo tempo. Questa scoperta invalidò i calcoli di Lord Kelvin, come fece osservare per primo, nel 1904, il fisico inglese di origine neozelandese Ernest Rutherford in una conferenza - alla quale assisteva lo stesso Kelvin, ormai vecchio (e per niente convinto).

Non ha senso infatti determinare quanto tempo sia occorso alla terra per raffreddarsi, senza tener conto del fatto che viene continuamente fornito calore dalle sostanze radioattive. Questo nuovo fattore potrebbe far sì che alla terra siano occorsi miliardi, e non milioni di anni per raffreddarsi dalla temperatura di fusione fino alla sua temperatura attuale. Anzi, con il passare del tempo, la temperatura della terra avrebbe potuto addirittura aumentare.

La radioattività in effetti ha finito per fornire le prove più decisive dell'età della terra (come, lo diremo nel capitolo sesto), perché ha permesso a geologi e geochimici di calcolare l'età delle rocce direttamente dalle quantità di uranio e di piombo in esse presenti. Grazie all'orologio della radioattività oggi sappiamo che alcune rocce terrestri hanno più di 3 miliardi di anni, e tutto fa credere che la terra stessa sia ancora più vecchia. Oggi si accetta come probabile un'età di 4,6

miliardi di anni per la terra nella sua forma solida attuale. In effetti, alcune delle rocce riportate qui dal mondo a noi più vicino, la luna, hanno dimostrato di avere tale età.

IL SOLE E IL SISTEMA SOLARE.

E per quanto riguarda il problema dell'energia del sole? La radioattività, insieme alle scoperte sul nucleo dell'atomo, aveva introdotto una nuova fonte di energia, molto più abbondante di quelle note in precedenza. Nel 1930 il fisico inglese Sir Arthur Eddington dischiuse una nuova linea di pensiero, avanzando l'ipotesi che la temperatura e la pressione al centro del sole dovessero essere elevatissime: la temperatura avrebbe potuto raggiungere i 15 milioni di gradi. A tali temperature e pressioni i nuclei atomici avrebbero potuto subire reazioni che non potevano, invece, avvenire nelle condizioni moderate dell'ambiente terrestre. Era noto che il sole è fatto soprattutto d'idrogeno: se quattro nuclei d'idrogeno si fossero combinati, formando un atomo di elio, avrebbero liberato ingenti quantitativi di energia.

Poi, nel 1938, il fisico americano di origine tedesca Hans Albrecht Bethe propose due modalità in cui avrebbe potuto verificarsi una combinazione dell'idrogeno che desse origine all'elio, nelle condizioni esistenti nel centro di stelle simili al sole: la prima implicava la conversione diretta dell'idrogeno in elio; l'altra prevedeva che un atomo di carbonio fungesse da intermediario nel processo. Entrambe le reazioni possono verificarsi nelle stelle; nel nostro sole, sembra che il meccanismo prevalente sia quello della conversione diretta dell'idrogeno. Entrambi i processi comportano la conversione della massa in energia. (Einstein, nella sua teoria della relatività ristretta, proposta nel 1905, aveva dimostrato che massa ed energia sono differenti aspetti di una stessa cosa, che possono convertirsi l'una nell'altra, e inoltre che si possono ottenere grandi quantità di energia dalla conversione di una piccola massa.)

La quantità di energia irradiata dal sole nell'unità di tempo richiede la scomparsa di una quantità di massa solare pari a circa 4 milioni di tonnellate al secondo. Sulle prime questa perdita può apparire spaventosa, ma la massa totale del sole è di 1 989 000 000 000 000 000 000 000 000 tonnellate, così che il sole perde solo lo 0,0000000000000000002 per cento della sua massa ogni secondo. Se il sole esistesse da 5 miliardi di anni, come pensano oggi gli astronomi, e se per tutto questo tempo avesse seguitato a irradiare al tasso odierno, avrebbe consumato solo 1 su 3300 della sua massa. È facile convincersi che il sole potrà quindi seguitare a irradiare energia nella misura attuale per miliardi di anni.

Nel 1940 sembrava pertanto ragionevole attribuire al sistema solare nel suo complesso un'età di 5 miliardi di anni. Si sarebbe potuto considerare risolto l'intero problema dell'età dell'universo, se non fosse stato per una nuova difficoltà segnalata dagli astronomi. Ora era la totalità dell'universo ad apparire troppo giovane per giustificare l'età del sistema solare. La difficoltà derivò dallo studio astronomico delle galassie lontane e da un fenomeno che era stato scoperto già nel 1842 dal fisico austriaco Christian Johann Doppler.

L'"effetto Doppler" è piuttosto familiare: di frequente lo si illustra con l'esempio del fischio di una locomotiva in moto, il cui suono risulta più acuto quando essa si avvicina e più grave quando si allontana. Questo cambiamento di altezza del suono è dovuto al semplice fatto che il numero delle onde sonore che colpiscono il timpano ogni secondo muta a causa del moto della sorgente sonora.

Come suggerì Doppler, tale effetto si verifica, oltre che con le onde sonore, anche con quelle luminose. Quando la luce proveniente da una sorgente in movimento raggiunge l'occhio, avviene un cambiamento di frequenza - cioè di colore - se la velocità della sorgente è sufficientemente elevata. Per esempio, se la sorgente si muove venendoci incontro, un numero maggiore di onde luminose si addensa in ogni secondo, e la luce percepita si sposta verso l'estremità delle frequenze maggiori (il violetto) dello spettro visibile. Se invece la sorgente si va allontanando da noi, le onde che ci

raggiungono ogni secondo sono in numero inferiore, e la luce si sposta verso l'estremo dello spettro dove le frequenze sono più basse (il rosso).

Gli astronomi studiano da molto tempo gli spettri delle stelle e ne conoscono bene l'aspetto regolare: una serie di righe luminose contro uno sfondo scuro, oppure di righe scure su uno sfondo luminoso, che mostrano rispettivamente l'emissione o l'assorbimento della luce da parte degli atomi a determinate lunghezze d'onda, o colori. Gli astronomi hanno pertanto potuto calcolare la velocità con cui le stelle si avvicinano o si allontanano da noi ("velocità radiale"), misurando lo spostamento delle righe spettrali dalle posizioni consuete verso l'estremo violetto o verso quello rosso dello spettro.

Fu il fisico francese Armand Hippolyte Louis Fizeau che, nel 1848, fece notare che la posizione delle righe spettrali poteva servire per studiare meglio l'effetto Doppler. Per tale ragione l'effetto Doppler viene chiamato "effetto Doppler-Fizeau", quando riguarda le onde luminose.

Molte sono state le applicazioni dell'effetto Doppler-Fizeau. Lo si può usare, nel nostro sistema solare, per dare una nuova dimostrazione della rotazione del sole. Le righe spettrali che provengono dalla porzione del sole che si avvicina a noi durante la rotazione si sposteranno verso il violetto ("violet shift"), mentre quelle provenienti dalla porzione del sole che si sta allontanando presenteranno uno spostamento verso il rosso ("red shift").

Certamente il moto delle macchie solari fornisce un metodo preferibile e più evidente per rilevare e misurare la rotazione del sole (è risultato che il periodo, rispetto alle stelle, è di circa 26 giorni).

Tuttavia l'effetto può essere usato anche per determinare la rotazione di oggetti privi di particolari riconoscibili, come gli anelli di Saturno.

L'effetto Doppler-Fizeau può essere utilizzato per studiare oggetti a qualsiasi distanza, purché si possa ottenerne uno spettro. Pertanto i suoi successi più sensazionali sono stati sicuramente quelli relativi alle stelle. Nel 1868 l'astronomo inglese Sir William Huggins misurò la velocità radiale di Sirio e annunciò che tale stella si stava allontanando da noi alla velocità di circa 46 chilometri al secondo. (Oggi abbiamo dati più esatti, ma per quel tempo era un dato già abbastanza buono.) Nel 1890 l'astronomo americano James Edward Keeler, usando strumenti più precisi, ottenne una serie di risultati quantitativamente attendibili; per esempio mostrò che Arturo si andava avvicinando alla terra alla velocità di 6 chilometri al secondo.

L'effetto può essere usato anche per accertare l'esistenza di sistemi stellari di cui non è possibile rilevare i particolari con il telescopio. Nel 1782, per esempio, un astronomo inglese, John Goodricke (che era sordomuto e morì a ventidue anni - un cervello di prim'ordine in un corpo tragicamente menomato), studiò la stella Algol, la cui luminosità aumenta e diminuisce con regolarità.

Goodricke spiegò tale fatto supponendo che una compagna scura girasse intorno ad Algol, passandole davanti periodicamente, eclissandola, e quindi diminuendone la luminosità.

Doveva passare però un secolo prima che questa plausibile ipotesi venisse sostenuta da ulteriori prove. Nel 1889 l'astronomo tedesco Hermann Karl Vogel mostrò che le righe spettrali di Algol presentavano alternativamente degli spostamenti verso il rosso e verso il violetto in corrispondenza del calo e dell'aumento di luminosità. La stella si allontana quando la compagna scura va avvicinandosi, mentre si avvicina quando la compagna si allontana. Si era così stabilito che Algol era una "stella binaria a eclissi".

Nel 1890 Vogel fece una scoperta simile, ma più generale. Trovò che certe stelle sembravano a un tempo avvicinarsi e allontanarsi: cioè le righe spettrali mostravano sia uno spostamento verso il rosso che uno verso il violetto, apparendo quindi sdoppiate. Vogel ne concluse che si trattava di un sistema binario a eclissi, in cui le due stelle, entrambe luminose, erano talmente vicine da apparire come un'unica stella anche se osservate col migliore telescopio. Stelle siffatte vengono chiamate "binarie spettroscopiche".

Nulla impediva di ritenere che l'effetto Doppler-Fizeau si verificasse anche al di fuori della nostra galassia. Ciò permise tra l'altro di studiare degli oggetti astronomici che si trovavano al di fuori della Via Lattea. Nel 1912 l'astronomo americano Vesto Melvin Slipher scoprì, misurando la velocità radiale della galassia di Andromeda, che essa si stava muovendo verso di noi alla velocità di circa 200 chilometri al secondo. Quando, però, passò a studiare altre galassie, scoprì che la maggior parte di esse si stava allontanando da noi. Nel 1914 Slipher aveva raccolto i dati relativi a quindici galassie, delle quali tredici erano in moto di allontanamento, alla considerevole velocità di varie centinaia di chilometri al secondo.

Proseguendo la ricerca in questa direzione, la situazione divenne sempre più sorprendente: salvo alcune galassie tra quelle più vicine, le altre erano tutte in fuga rispetto a noi. Quando poi il progresso delle tecniche permise di esaminare galassie meno luminose e presumibilmente più lontane, lo spostamento verso il rosso osservato aumentò ulteriormente.

Nel 1929 Hubble, a Monte Wilson, ipotizzò che le velocità di recessione crescessero con regolarità, proporzionalmente alla distanza delle rispettive galassie. Se la galassia A era a una distanza doppia della galassia B, la sua velocità di recessione, secondo l'ipotesi di Hubble, sarebbe stata doppia della velocità della galassia B. Questa relazione è nota come "legge di Hubble".

La legge di Hubble ha avuto da allora continue conferme dall'osservazione. A partire dal 1929, Milton La Salle Humason usò il telescopio da 100 pollici di Monte Wilson per ottenere spettri di galassie sempre meno luminose; quelle più lontane che riuscì a esaminare si andavano allontanando alla velocità di 40 mila chilometri al secondo. Quando entrò in funzione il telescopio da 200 pollici, si poterono studiare galassie ancora più distanti, e negli anni sessanta fu possibile scorgere oggetti talmente lontani che la loro velocità di recessione arrivava a 240 mila chilometri al secondo.

Perché accadeva tutto ciò? Per capirlo, immaginate un pallone sulla cui superficie siano segnati dei punti: quando lo si gonfia, i punti si allontanano l'uno dall'altro. Un osservatore situato in uno qualsiasi dei punti vedrebbe tutti gli altri punti allontanarsi, e ciò a una velocità tanto maggiore quanto più essi sono lontani. Non avrebbe alcuna importanza la scelta di un punto di osservazione particolare: l'effetto sarebbe lo stesso, ovunque sul pallone.

Le galassie si comportano come se l'universo si stesse espandendo analogamente alla superficie tridimensionale di un pallone quadridimensionale. Ormai gli astronomi hanno accettato pressoché unanimemente la realtà di tale espansione; le «equazioni di campo» della teoria della relatività generale di Einstein possono essere interpretate in modo da accordarsi con un universo in espansione.

IL BIG BANG.

Se l'universo è stato costantemente in espansione, è logico supporre che nel passato fosse più piccolo di quanto non sia oggi, e che, in un qualche momento di un passato molto remoto, abbia avuto origine da un nucleo denso di materia.

Il primo a mettere in rilievo tale possibilità, nel 1922, fu il matematico russo Aleksandr Aleksandrovic' Friedmann. Le prove a favore della recessione delle galassie non erano state ancora presentate da Hubble, e Friedmann fece un lavoro esclusivamente teorico, basandosi sulle equazioni di Einstein. Ma tre anni dopo egli morì di febbre tifoide all'età di trentasette anni, e il suo lavoro restò perlopiù sconosciuto.

Nel 1927 l'astronomo belga Georges Lemaître, presumibilmente senza essere al corrente del lavoro di Friedmann, elaborò uno schema simile di universo in espansione. Se l'universo si andava espandendo, doveva esserci stato un tempo nel passato in cui era estremamente piccolo, e il più denso possibile. Lemaître chiamò questo stato l'"uovo cosmico".

Conformemente alle equazioni di Einstein, l'universo non poteva far altro che espandersi; considerando poi la sua tremenda densità, l'espansione doveva essere avvenuta con una violenza

estrema. Le galassie di oggi sono i frammenti dell'uovo cosmico; la loro recessione, l'eco di quella lontanissima esplosione.

Anche il lavoro di Lemaître passò comunque inosservato, fino al giorno in cui fu additato all'attenzione degli scienziati dal più famoso astronomo inglese Arthur Stanley Eddington.

Fu tuttavia il fisico russo-americano George Gamow che, negli anni trenta e quaranta, fece una vera e propria opera di divulgazione di quest'idea secondo cui l'universo avrebbe avuto inizio con un'esplosione, che egli chiamò "big bang", grande scoppio - nome che da allora è stato universalmente adottato.

Non tutti rimasero soddisfatti dell'idea di un big bang come inizio dell'espansione dell'universo. Nel 1948 due astronomi di origine austriaca, Hermann Bondi e Thomas Gold, avanzarono una teoria - in seguito divulgata ed estesa dall'astronomo inglese Fred Hoyle - che, pur accettando l'espansione dell'universo, rifiutava il big bang. Via via che le galassie si allontanano l'una dall'altra, se ne formano di nuove nello spazio intergalattico con la materia che viene creata dal nulla a una velocità troppo piccola perché le nostre tecniche attuali riescano a rilevare il fenomeno. Il risultato è che l'universo resta sostanzialmente lo stesso per tutta l'eternità. Esso ha avuto lo stesso aspetto che ha oggi durante innumerevoli eoni del passato, e seguiterà ad avere lo stesso aspetto durante innumerevoli eoni del futuro, così che non ci sono né un inizio né una fine. Tale teoria viene chiamata della "creazione continua", e dà luogo a un universo stazionario ("steady-state universe").

Per più di un decennio la controversia tra big bang e creazione continua seguitò a divampare, senza che una prova decisiva obbligasse a schierarsi definitivamente a favore dell'una o dell'altra teoria.

Nel 1949 Gamow aveva fatto osservare che, se veramente c'era stato un big bang, la radiazione che l'aveva accompagnato doveva aver perso energia con l'espandersi dell'universo, e avrebbe dovuto manifestarsi oggi sotto forma di onde radio provenienti da tutte le parti del cielo come un fondo omogeneo. La radiazione avrebbe dovuto essere quella caratteristica dei corpi alla temperatura di 5 gradi K (cioè 5 gradi sopra allo zero assoluto, ossia meno 268 gradi C). Questa idea venne in seguito sviluppata dal fisico americano Robert Henry Dicke.

Nel maggio 1964 il fisico tedesco-americano Arno Allan Penzias e un radioastronomo americano, Robert Woodrow Wilson, seguendo l'indicazione di Dicke, rivelarono un fondo di radioonde avente caratteristiche molto simili a quelle previste da Gamow; tale radiazione indicava una temperatura media dell'universo di 3 gradi K.

La scoperta di questo fondo di onde radio costituisce, secondo quasi tutti gli astronomi, una prova conclusiva in favore della teoria del big bang. Oggi si accetta generalmente che il big bang sia avvenuto realmente, mentre l'idea della creazione continua è stata abbandonata.

Quando è avvenuto il big bang? Grazie allo spostamento verso il rosso, facile da misurarsi, conosciamo con una ragionevole certezza la velocità con cui le galassie recedono. Dobbiamo però conoscere anche la loro distanza. Maggiore è questa distanza, più tempo è occorso perché venisse raggiunta la posizione attuale in conseguenza del moto di recessione. Non è però facile determinare tale distanza.

Un dato che solitamente viene considerato almeno approssimativamente corretto è 15 miliardi di anni. Se poniamo un eone pari a un miliardo di anni, allora il big bang è avvenuto 15 eoni fa; ma potrebbe benissimo essere avvenuto anche soltanto 10 eoni fa, oppure addirittura 20 eoni fa.

Cosa è successo prima del big bang? Da dove è venuto l'uovo cosmico? Alcuni astronomi ritengono, in base a speculazioni teoriche, che l'universo abbia avuto inizio come un gas molto rarefatto, che si sarebbe condensato lentamente, forse formando stelle e galassie, e che avrebbe seguitato a contrarsi fino a formare un uovo cosmico in un "big crunch" (grande collasso). La formazione dell'uovo cosmico sarebbe stata seguita immediatamente dalla sua esplosione nel big

bang, che avrebbe dato origine di nuovo a stelle e galassie, ora però in espansione, fino al giorno in cui saranno di nuovo gas rarefatto.

Quanto al futuro, potrebbe darsi che l'universo si espanda per sempre, diventando sempre più rarefatto, con una densità globale sempre minore, sempre più prossimo al vuoto, al nulla. Se poi guardiamo nel passato, al di là del big bang, immaginando che il tempo scorra all'indietro, di nuovo l'universo ci apparirà espandersi per un tempo indefinito, approssimandosi sempre più al vuoto assoluto.

Un simile scenario di contrazione e successiva espansione, in cui noi occuperemmo un posto abbastanza prossimo al big bang perché la vita sia possibile (se così non fosse, non saremmo qui a osservare l'universo e a cercare di giungere a qualche conclusione), va sotto il nome di "universo aperto".

Non esiste alcun modo oggi (né esisterà forse mai) per procurarsi degli indizi che ci informino su cosa è successo prima del big bang; alcuni astronomi sono anzi riluttanti a occuparsi della questione.

Recentemente si è sostenuto che l'uovo cosmico si sarebbe formato dal niente; si tratterebbe in tal caso ancora di un universo aperto, senza però la prima fase di contrazione.

In base a questa ipotesi potrebbe darsi che, in un mare infinito di nulla, possa verificarsi in tempi diversi un numero infinito di big bang; in tal caso il nostro non sarebbe che uno di un'infinità di universi, ciascuno con una propria massa, un proprio punto di partenza, e, per quanto possiamo saperne, con delle proprie leggi naturali. Potrebbe darsi che solo una combinazione molto rara di leggi naturali renda possibili le stelle, le galassie e la vita; in tal caso noi stessi ci troveremmo in una situazione tanto eccezionale solo perché non potremmo essere in nessun'altra.

Inutile dire che non esistono prove neppure per la comparsa di un uovo cosmico sbucato dal nulla, o in favore di una molteplicità di universi - e che forse tali prove non esisteranno mai. Il mondo sarebbe, però, veramente triste se non si concedesse agli scienziati di abbandonarsi alle loro speculazioni poetiche in assenza di prove.

Del resto, siamo davvero sicuri che l'universo seguiterà a espandersi per sempre? La sua attuale espansione è contrastata dalla sua stessa attrazione gravitazionale, la quale potrebbe essere sufficiente a rallentare la velocità di recessione fino a ridurla a zero, e potrebbe finire per obbligare l'universo a contrarsi. L'universo potrebbe espandersi e poi contrarsi in un "big crunch", scomparendo di nuovo nel nulla - oppure tornare a espandersi di rimbalzo, e poi, un giorno o l'altro, contrarsi di nuovo, in una serie infinita di oscillazioni.

In entrambi i casi avremmo un "universo chiuso".

Potrebbe comunque esserci una possibilità di decidere se l'universo è aperto o chiuso; ritornerò su questo punto più avanti, nel capitolo settimo.

LA MORTE DEL SOLE.

L'espansione dell'universo, anche se continuasse indefinitamente, non avrebbe conseguenze dirette per le singole galassie o per gli ammassi di galassie. Anche se tutte le galassie distanti seguitassero ad allontanarsi, fino a essere fuori dalla portata anche dei migliori strumenti possibili, la nostra galassia resterebbe intatta e le stelle che la compongono resterebbero saldamente vincolate entro il suo campo gravitazionale. E neppure perderemmo di vista le altre galassie del gruppo locale. Tuttavia non sono affatto esclusi dei cambiamenti all'interno della nostra galassia - forse anche disastrosi per il nostro pianeta e la vita su di esso - ancorché indipendenti dall'espansione universale.

La stessa concezione della possibilità di cambiamenti nei corpi celesti è del tutto moderna. Gli antichi filosofi greci - in particolare Aristotele - pensavano che i cieli fossero perfetti e immutabili. Qualsiasi cambiamento, corruzione e decadimento doveva essere confinato alle regioni imperfette che giacciono al di sotto della sfera più vicina - quella della luna. Era una questione di

senso comune, perché certamente, da una generazione all'altra, da un secolo all'altro, non c'erano stati cambiamenti significativi nel cielo.

Certo, misteriose comete si materializzavano di quando in quando da chi sa dove - andavano e venivano imprevedibilmente, velando leggermente le stelle come fantasmi dall'aspetto sinistro, con quelle code trasparenti che facevano pensare ai capelli al vento di una creatura terribile che profetizzasse ogni sorta di mali. In ogni secolo sono visibili a occhio nudo circa venticinque di questi oggetti. (Parleremo delle comete più a fondo nel prossimo capitolo.) Aristotele aveva cercato di conciliare queste apparizioni con la perfezione dei cieli, affermando che esse appartenevano all'atmosfera terrestre, corrotta e mutevole. Questa concezione prevalse fin quasi alla fine del sedicesimo secolo; ma nel 1577 (quando ancora non era stato inventato il telescopio), l'astronomo danese Tycho Brahe tentò di misurare la parallasse di una cometa splendente e scoprì che non era possibile. Dato che la parallasse della luna era invece misurabile, Tycho Brahe fu obbligato a concludere che la cometa si trovava molto al di là della luna e che nei cieli esistevano l'imperfezione e il mutamento. (Il filosofo romano Seneca aveva sospettato già nel primo secolo dopo Cristo che così stessero le cose.)

In realtà, già molto tempo prima erano stati osservati dei cambiamenti nelle stelle stesse, ma a quanto pare non avevano suscitato grande curiosità. Per esempio, esistono le stelle variabili, che di notte in notte mutano la loro luminosità in misura apprezzabile, anche se osservate a occhio nudo; eppure nessun astronomo greco ha fatto cenno alle variazioni di luminosità di una qualsiasi stella. Potrebbe darsi che tali accenni siano andati persi, ma potrebbe anche darsi che gli astronomi greci, semplicemente, abbiano preferito non vedere questi fenomeni. Un caso interessante, a questo proposito, è quello di Algol, la seconda stella per luminosità nella costellazione di Perseo, che perde due terzi della sua luminosità e poi li riguadagna, in un ciclo che dura 69 ore (oggi sappiamo, grazie a Goodricke e a Vogel, che Algol ha una compagna oscura che la eclissa, causando a intervalli di 69 ore un calo della sua luminosità). Gli astronomi greci non fecero alcuna menzione dell'oscuramento di Algol, e neppure vi accennarono gli astronomi arabi del Medioevo. Purtuttavia, i greci posero questa stella in testa alla Medusa, il demone che trasformava gli uomini in pietre. Lo stesso nome Algol, che in arabo significa «vampiro», è allusivo. È chiaro che questa strana stella metteva a disagio gli antichi.

Una stella della costellazione della Balena (Cetus), Omicron Ceti, varia in modo irregolare: qualche volta ha la stessa luminosità della Stella Polare, talaltra non si riesce neppure a vederla. Né i greci né gli arabi ne fecero menzione; il primo a parlarne fu l'astronomo olandese David Fabricius, nel 1596. Più tardi essa venne chiamata Mira («meravigliosa», in latino): segno che gli astronomi ormai avevano meno paura dei cambiamenti che scorgevano in cielo.

NOVAE E SUPERNOVAE.

Ancora più straordinaria era l'improvvisa comparsa di "nuove stelle" nei cieli, fatto che i greci non potevano ignorare completamente. Si dice che Ipparco sia rimasto così impressionato, nel 134 avanti Cristo, alla vista di una di queste nuove stelle, nella costellazione dello Scorpione, che disegnò la prima mappa stellare, perché in futuro fosse più facile accorgersi della comparsa di nuove stelle.

Nel 1054, nella costellazione del Toro, fu avvistata un'altra nuova stella eccezionalmente brillante, che superava in splendore Venere.

Per settimane la si poté vedere anche in pieno giorno. Gli astronomi cinesi e giapponesi ne annotarono con cura la posizione; tali annotazioni sono giunte fino a noi. Invece nel mondo occidentale la situazione dell'astronomia a quei tempi era così miserevole che non è sopravvissuta alcuna registrazione di un evento tanto degno di nota, probabilmente perché tali avvenimenti non venivano affatto registrati.

Le cose stavano diversamente nel 1572, quando fece la sua comparsa nella costellazione di Cassiopea una nuova stella, altrettanto splendente di quella del 1054. L'astronomia europea si stava risvegliando dal suo lungo letargo. Il giovane Tycho Brahe osservò attentamente la nuova stella e scrisse un libro, intitolato "De Nova Stella". Si deve al titolo di questo libro se il termine "nova" venne adottato per qualsiasi nuova stella.

Nel 1604 apparve ancora un'altra formidabile nova, nella costellazione del Serpente. Non era altrettanto luminosa di quella del 1572, ma lo era abbastanza da superare Marte. Fu Giovanni Keplero a osservare questa nuova stella, e anche lui scrisse un libro sull'argomento.

Dopo l'invenzione del telescopio le novae persero un po' del loro mistero. Naturalmente non erano affatto delle stelle nuove, ma delle stelle fioche diventate improvvisamente visibili, in seguito all'aumento della loro luminosità.

Con il tempo, il numero di novae avvistate crebbe di continuo. In genere queste stelle aumentavano la loro luminosità di migliaia di volte, in certi casi nel giro di pochi giorni, per poi oscurarsi lentamente nel giro di qualche mese, tornando nelle condizioni originarie. Si sono annoverate in media una ventina di novae all'anno per galassia (compresa la nostra).

Dall'esame degli spostamenti Doppler-Fizeau che avvenivano durante la formazione delle novae e da altri particolari dei loro spettri, si dedusse che le novae erano stelle che esplodevano. In alcuni casi la materia stellare proiettata nello spazio era visibile sotto forma di involucro gassoso in espansione, illuminato dai residui della stella.

Nel complesso le novae comparse nei tempi più recenti non erano particolarmente brillanti. Quella più luminosa, la Nova Aquilae, comparve nel giugno del 1918 nella costellazione dell'Aquila. Al massimo del suo splendore, essa uguagliava quasi la stella Sirio, la più luminosa stella del cielo. Tuttavia, nessuna ha potuto competere con lo splendore di Giove e di Venere, come era accaduto nel caso delle novae osservate da Tycho Brahe e da Keplero.

Ma la nova più straordinaria avvistata dopo l'avvento del telescopio non venne riconosciuta come tale. L'astronomo tedesco Ernst Hartwig la notò nel 1885; ma, anche al suo massimo splendore, essa non raggiunse la magnitudine sette e non fu mai visibile a occhio nudo.

Essa fece la sua apparizione in quella che allora veniva chiamata nebulosa di Andromeda; al suo massimo, aveva un decimo della luminosità di quest'ultima. A quel tempo non ci si rendeva conto della reale distanza della nebulosa di Andromeda né si era ancora compreso che essa in realtà era una galassia formata da varie centinaia di miliardi di stelle; pertanto la luminosità apparente della nova non suscitò particolare emozione.

Quando Curtis e Hubble calcolarono la distanza di quella che nel frattempo era stata chiamata galassia di Andromeda, gli astronomi furono letteralmente strabiliati dallo splendore della nova del 1885.

Le dozzine di novae che furono scoperte nella galassia di Andromeda da Curtis e Hubble erano assai meno luminose di quella del 1885, veramente notevole per la sua luminosità, se si tiene conto della distanza.

Nel 1934 l'astronomo svizzero Fritz Zwicky cominciò un esame sistematico delle galassie distanti, alla ricerca di novae di luminosità eccezionale. Qualunque nova paragonabile a quella del 1885 in Andromeda sarebbe stata senz'altro visibile, perché tali oggetti hanno una luminosità pari a quella di un'intera galassia; se dunque si poteva scorgere una galassia, si doveva vedere anche un'eventuale nova del genere. Nel 1938 Zwicky aveva avvistato non meno di dodici di queste novae. Egli diede a tali oggetti luminosi come galassie il nome di "supernovae". Di conseguenza la nova del 1885 venne ribattezzata S Andromedae, dove S sta per «supernova».

Mentre le novae ordinarie raggiungono in media una magnitudine assoluta di meno 8 (viste a una distanza di 10 parsec, avrebbero cioè 25 volte la luminosità di Venere), una supernova può arrivare a una magnitudine assoluta di meno 17. Un simile oggetto sarebbe 4000 volte più luminoso di una normale nova, ossia quasi un miliardo di volte più luminoso del sole. O, per lo meno, lo sarebbe nel momento del suo massimo splendore.

Retrospettivamente possiamo renderci conto che le novae degli anni 1054, 1572 e 1604 erano anch'esse supernovae. Cosa ancora più importante, si deve ammettere che siano esplose nella nostra galassia se se ne vuol spiegare l'eccezionale splendore.

Anche diverse novae di cui hanno lasciato notizia gli scrupolosi astronomi cinesi dei tempi antichi e medioevali devono esser state supernovae. Una di queste venne segnalata già nel 185 dopo Cristo; e un'altra nella costellazione meridionale del Lupo, avvistata nel 1006, deve esser stata la più luminosa di quelle apparse in epoca storica.

Quando era al massimo, la sua luminosità era forse 200 volte quella di Venere e un decimo di quella della luna piena.

Gli astronomi, a giudicare dai resti dell'esplosione, sospettano che una supernova ancora più splendente (che avrebbe potuto competere addirittura con la luna) sia apparsa nella costellazione della Vela, all'estremo sud del cielo, 11 mila anni or sono, quando non c'erano astronomi a osservare il cielo e l'arte della scrittura non era stata ancora inventata. (È tuttavia possibile che alcuni pittogrammi preistorici alludano a questa nova.)

Il comportamento fisico delle supernovae è molto diverso da quello delle novae ordinarie, e gli astronomi sono impazienti di arrivare ad analizzarne lo spettro; il principale ostacolo è la rarità delle supernovae. La loro frequenza media è di circa 1 ogni 50 anni per galassia. Anche se fino a oggi gli astronomi sono riusciti ad avvistarne più di 50, si è trattato sempre di supernovae situate in galassie molto lontane, che quindi non si potevano studiare a fondo.

La supernova di Andromeda del 1885, quella più vicina a noi negli ultimi 350 anni, è comparsa una ventina di anni prima che fosse pienamente sviluppata l'applicazione della fotografia all'astronomia; pertanto, non possediamo la registrazione del suo spettro.

Tuttavia, la distribuzione nel tempo delle supernovae è casuale. In tempi recenti si sono localizzate, in una sola galassia, 3 supernovae in soli 17 anni. Gli astronomi terrestri potrebbero ancora aver fortuna. In effetti c'è una particolare stella che attira la loro attenzione: Eta Carinae è chiaramente instabile e da diverso tempo sta alternando aumenti e cali di luminosità. Nel 1840 raggiunse un tale splendore da essere, per un certo tempo, la seconda stella del cielo per luminosità. Vari indizi fanno pensare che possa essere in procinto di esplodere diventando una supernova. C'è però il problema che, per gli astronomi, «essere in procinto» può voler dire domani come tra diecimila anni.

Tra l'altro, la costellazione della Carena, in cui è situata Eta Carinae, si trova, come le costellazioni della Vela e del Lupo, talmente a sud che anche se vi comparisse una supernova, questa non sarebbe visibile né dall'Europa né da gran parte degli Stati Uniti.

Ma cos'è che causa queste violente esplosioni luminose, e perché certe stelle diventano novae e certe altre supernovae? Per rispondere, dobbiamo fare una digressione.

Già nel 1834 Bessel (l'astronomo che qualche anno dopo misurò per primo la parallasse di una stella) aveva osservato che Sirio e Procione cambiavano leggermente di posizione di anno in anno, in un modo che non sembrava dipendere dal moto della terra. I loro moti non erano rettilinei, ma curvilinei, e Bessel giunse alla conclusione che ognuna delle due stelle stava descrivendo un'orbita intorno a qualche altro oggetto.

A giudicare dal modo in cui Sirio e Procione descrivevano tali orbite, questo «oggetto» doveva esercitare in entrambi i casi una potente attrazione gravitazionale che non poteva essere attribuita ad altro che a una stella. In particolare, la compagna di Sirio avrebbe dovuto avere una massa pari a quella del nostro sole, per giustificare il moto della stella luminosa. Così fu deciso che le compagne dovevano essere stelle; ma, poiché erano invisibili ai telescopi di quei tempi, vennero chiamate compagne oscure. Si pensò che fossero vecchie stelle diventate sempre meno luminose con l'andar del tempo.

Poi, nel 1862, Alvan Clark, un costruttore di strumenti scientifici americano, provando un nuovo telescopio, avvistò, vicino a Sirio, una stella oscura, la quale, a osservazioni successive, risultò essere proprio la prevista compagna. Sirio e la stella oscura giravano intorno a un centro

comune di gravità, con un periodo di circa cinquanta anni. La compagna di Sirio (oggi chiamata Sirio B, mentre Sirio stessa viene chiamata Sirio A) ha una magnitudine assoluta di solo 11,2; pertanto ha una luminosità pari a solo 1 su 400 di quella del nostro sole, nonostante abbia massa uguale.

Sembrava che Sirio B fosse una stella moribonda. Ma, nel 1914, l'astronomo americano Walter Sydney Adams, dopo aver studiato lo spettro di Sirio B, concluse che la sua temperatura doveva essere addirittura uguale a quella di Sirio A, e superiore a quella del nostro sole; infatti le vibrazioni atomiche che davano origine alle particolari righe di assorbimento del suo spettro potevano esser prodotte solo a temperature molto alte. Ma se Sirio B era così calda, perché emetteva una luce così debole? L'unica risposta possibile era che fosse considerevolmente più piccola del nostro sole. Essendo più calda, essa irradiava più luce per unità di superficie, ma la sua superficie totale doveva essere molto piccola, per rendere ragione della ridotta quantità totale di luce emessa. In effetti, oggi sappiamo che Sirio B non può avere un diametro superiore agli 11 mila chilometri: ha dunque un volume inferiore a quello della terra, pur avendo una massa uguale a quella del sole! Con una simile massa compressa in un volume cosi piccolo, la densità media della stella dovrebbe essere circa 130 mila volte quella del platino.

Ci si trovava di fronte addirittura a uno stato completamente nuovo della materia; per fortuna, i fisici ormai non avevano difficoltà a trovare la soluzione del problema. Essi sapevano che nella materia comune gli atomi sono composti di particelle piccolissime, talmente piccole che quasi tutto il volume dell'atomo è spazio «vuoto».

Sottoposte a una pressione enorme, le particelle subatomiche possono essere obbligate ad avvicinarsi l'una all'altra, formando una massa superdensa. Eppure, perfino nella superdensa Sirio B, le particelle subatomiche si trovano a una distanza reciproca sufficiente a consentire loro di muoversi liberamente, così che la materia molto più densa del platino si comporta ancora come un gas. Il fisico inglese Ralph Howard Fowler suggerì nel 1925 di definirlo gas "degenere", e il fisico sovietico Lev Davidovic' Landau fece osservare negli anni trenta che anche le stelle normali, come il nostro sole, devono essere formate, al centro, di gas degenere.

Anche la compagna di Procione (Procione B), localizzata per la prima volta nel 1896 da J. M. Schaberle del Lick Observatory, in California, risultò una stella superdensa, benché la sua massa fosse soltanto cinque ottavi di quella di Sirio B; con il passare degli anni, altre ne furono trovate. Queste stelle sono chiamate "nane bianche", perché presentano un piccolo volume e un'alta temperatura, ed emettono luce bianca. Le nane bianche sono probabilmente numerose; forse raggiungono il 3 per cento del totale delle stelle. Nonostante questo, in un futuro prevedibile, potremo scoprire solo quelle situate nelle nostre vicinanze, e ciò a causa della loro scarsa luminosità dovuta alle dimensioni ridotte. (Esistono anche delle "nane rosse", notevolmente più piccole del nostro sole, ma non tanto quanto le nane bianche. Le nane rosse sono fredde e hanno una densità normale. Sono le stelle più comuni - costituiscono i tre quarti del totale - ma sono anch'esse difficili da avvistare, come le nane bianche, sempre a causa della loro scarsa luminosità. Una coppia di nane rosse, distanti da noi solo sei anni luce, è stata scoperta solamente nel 1948. Sulle trentasei stelle note distanti meno di quattordici anni luce dal sole, ventuno sono nane rosse e tre nane bianche. Tra di esse non vi sono giganti, e solo due, Sirio e Procione, sono decisamente più luminose del nostro sole.)

L'anno successivo a quello in cui furono scoperte le proprietà straordinarie di Sirio B, Albert Einstein presentò la sua teoria della relatività generale, che rappresentava soprattutto un nuovo modo di concepire la gravità, e che consentiva di predire che la luce emessa da una sorgente dotata di un campo gravitazionale molto intenso doveva presentare uno spostamento verso il rosso ("Einstein shift"). Adams, affascinato dalla scoperta delle nane bianche, si mise a studiare attentamente lo spettro di Sirio B e trovò che esso presentava effettivamente lo spostamento verso il rosso previsto da Einstein.

Questo era un punto a favore non solo della teoria di Einstein, ma anche della superdensità di Sirio B; infatti, in una stella comune come il nostro sole, lo spostamento verso il rosso avrebbe dovuto essere solo un trentesimo di quello osservato in Sirio B. Tuttavia, all'inizio degli anni sessanta anche questo effetto così piccolo prodotto dal nostro sole poté essere osservato, e fornì un'ulteriore conferma della teoria della relatività generale.

Ma cos'hanno a che fare le nane bianche con le supernovae, l'argomento di cui stavamo parlando? Per capirlo, ritorniamo un momento alla supernova del 1054.

Nel 1844 Lord Rosse, cercando la posizione nella costellazione del Toro in cui gli astronomi orientali avevano detto di aver avvistato la supernova del 1054, studiò un piccolo oggetto dall'aspetto nebuloso, che chiamò «nebulosa granchio» ("Crab Nebula"), a causa della sua irregolarità e delle sue protuberanze simili a chele. Osservazioni continuate nel corso di decenni mostrarono che la macchia gassosa si stava lentamente espandendo; fu possibile calcolare la velocità effettiva di espansione in base all'effetto Doppler-Fizeau, e ciò permise, tenuto conto della velocità apparente di espansione, il calcolo della distanza della nebulosa granchio, che risultò essere di 3500 anni luce da noi. La velocità di espansione permise anche di stabilire che all'inizio del fenomeno di espansione del gas vi era stata un'esplosione in un punto centrale, circa 900 anni or sono, il che concorda con la data del 1054. Quindi si può affermare con una certa sicurezza che la nebulosa granchio, che oggi occupa un volume del diametro di circa 5 anni luce, rappresenta i resti della supernova del 1054.

Nelle posizioni indicate per le supernovae di Tycho Brahe e di Keplero non è stata osservata un'analoga regione di gas turbolenti, anche se si sono osservate delle piccole macchie nebulose in vicinanza di ciascuna delle due posizioni. Esistono, tuttavia, circa 150 nebulose planetarie, i cui anelli di gas a forma di ciambella possono testimoniare grandi esplosioni stellari. Una nube particolarmente estesa e rada di gas, la nebulosa del velo nel Cigno, potrebbe costituire ciò che resta dell'esplosione, avvenuta 30 mila anni or sono, di una supernova che dovrebbe esser stata ancora più vicina e più luminosa della supernova del 1054 - ma a quell'epoca non esisteva sulla terra alcuna civiltà pronta a prender nota dello spettacolo eccezionale.

Alcuni indizi farebbero inoltre congetturare che una nebulosità molto debole che avvolge la costellazione di Orione possa essere ciò che resta di una supernova ancora precedente.

Ma cosa ne è stato, in tutti questi casi, della stella esplosa? È semplicemente svanita in un enorme sbuffo di gas? La nebulosa granchio, per esempio, costituisce proprio "tutto" quanto rimane della supernova del 1054, e si limiterà a espandersi, finché anche questa ultima traccia della stella sarà persa per sempre? Oppure esiste qualche altro resto che è tuttora una stella, ma troppo piccola e troppo debole perché noi la possiamo vedere? In altre parole, è rimasta come residuo una nana bianca (o qualcosa di ancora più estremo)? Le nane bianche rappresentano, per così dire, i cadaveri di stelle che erano un tempo simili al nostro sole? Queste domande ci conducono al problema dell'evoluzione delle stelle.

L'EVOLUZIONE DELLE STELLE.

Tra le stelle che sono più vicine a noi, quelle più luminose sembrano molto calde, e quelle meno luminose più fredde; sembra esserci cioè una relazione piuttosto regolare tra luminosità e temperatura. Se si costruisce un diagramma delle magnitudini assolute in funzione delle temperature superficiali, si trova che quasi tutte le stelle più note rientrano in una fascia piuttosto ristretta, che passa gradatamente da stelle di bassa luminosità e temperatura a stelle di alta luminosità e temperatura. Tale fascia è chiamata "sequenza principale". Il diagramma fu elaborato per la prima volta dall'astronomo americano Henry Norris Russell, che proseguiva uno studio analogo compiuto da Hertzsprung (l'astronomo che determinò per primo le magnitudini assolute delle cefeidi); pertanto esso prese il nome di "diagramma di Hertzsprung-Russell", o "diagramma H-R".

Ma non tutte le stelle appartengono alla sequenza principale. Esistono delle stelle rosse che, nonostante la loro temperatura alla superficie piuttosto bassa, hanno delle elevate magnitudini assolute, perché la loro massa è diffusa e rarefatta tanto da occupare un enorme volume, e la modesta quantità di calore emessa per unità di area, moltiplicata per la superficie, grandissima, dà un totale impressionante. Tra queste giganti rosse le più note sono Betelgeuse e Antares; sono talmente fredde (come si scoprì nel 1964) che molte di loro hanno atmosfere ricche di vapor acqueo, che si dissocierebbe in idrogeno e ossigeno a temperature superiori come quella del nostro sole. Anche le nane bianche, con le loro alte temperature, non fanno parte della sequenza principale.

Nel 1924 Eddington osservò che l'interno di tutte le stelle doveva avere una temperatura altissima. Data la grande massa di una stella, la sua forza gravitazionale è immensa. Per evitare il collasso della stella, questa immane forza deve essere controbilanciata da un'uguale pressione interna, dovuta al calore e all'energia della radiazione. Maggiore è la massa della stella, maggiore deve essere anche la temperatura al suo centro necessaria per controbilanciare la forza gravitazionale. Per conservare una temperatura e una pressione di radiazione così elevate, le stelle di maggior massa devono bruciare energia più velocemente - e pertanto essere più luminose - delle stelle di massa minore; questa è la "relazione massa-luminosità". Si tratta di una relazione drastica, perché la luminosità varia come la sesta o la settima potenza della massa: cioè se la massa diventa tripla, per esempio, la luminosità aumenta secondo un fattore 750.

Ne consegue che le stelle di grande massa sono estremamente prodighe del loro combustibile - l'idrogeno - e hanno quindi una vita più breve. Le riserve di idrogeno del nostro sole sono sufficienti, al ritmo odierno di consumo, per miliardi di anni. Una stella luminosa come Capella deve esaurirsi in circa 20 milioni di anni, e alcune delle stelle più luminose - come Rigel - non potranno durare per più di 1 o 2 milioni di anni; quindi le stelle molto luminose devono essere anche molto giovani. Nuove stelle forse si stanno formando anche oggi in regioni dello spazio in cui vi è abbastanza polvere per fornire la materia prima necessaria.

E in effetti, nel 1955, l'astronomo americano George Herbig scoprì in mezzo alla polvere della nebulosa di Orione due stelle che non erano visibili in fotografie di quella stessa regione prese qualche anno prima. Potrebbero essere due stelle che si sono formate durante l'arco della nostra vita.

Nel 1965 erano ormai state individuate centinaia di stelle così fredde che non splendevano neppure; si arrivò a scoprirle attraverso la loro radiazione infrarossa, e perciò vengono chiamate "giganti infrarosse", perché sono costituite di grandi quantitativi di materia rarefatta.

Presumibilmente sono ammassi di polvere e gas che accrescendosi diventano gradatamente più caldi, e finiranno per diventare abbastanza caldi da risplendere.

Il successivo passo avanti nello studio dell'evoluzione stellare provenne dall'analisi delle stelle degli ammassi globulari. Le stelle di un ammasso si trovano all'incirca alla stessa distanza da noi, perciò hanno una magnitudine apparente proporzionale alla magnitudine assoluta (come nel caso delle cefeidi delle nubi di Magellano).

Conoscendo così la loro magnitudine, si può tracciare il relativo diagramma H-R. Si è trovato che le stelle più fredde (che bruciano più lentamente il loro idrogeno) appartengono alla sequenza principale, mentre quelle più calde tendono a discostarsene. A causa del loro alto tasso di combustione e del rapido invecchiamento, seguono un andamento ben definito, che rappresenta vari stadi evolutivi: prima si spostano verso la regione delle giganti rosse, poi riattraversano la sequenza principale, e si avviano a diventare nane bianche.

In base a queste conoscenze e ad alcune considerazioni teoriche sulle possibili combinazioni delle particelle subatomiche in presenza di temperature e pressioni elevate, Fred Hoyle ha tracciato un quadro dettagliato del corso dell'evoluzione delle stelle. Secondo Hoyle, una stella nei primi stadi cambia assai poco di volume e di temperatura. (È questa la situazione del nostro sole oggi, e tale continuerà a essere per un bel pezzo.) La stella converte il suo idrogeno, nell'interno estremamente caldo, in elio, e questo quindi si accumula al centro. Quando questo nocciolo di elio

ha raggiunto una certa dimensione, il volume e la temperatura della stella cominciano a cambiare in modo drastico. La stella si espande enormemente e la sua superficie si raffredda. In altre parole, essa abbandona la sequenza principale, avviandosi verso la regione delle giganti rosse. Più grande è la massa della stella, più velocemente essa raggiunge questa fase. Negli ammassi globulari, le stelle di massa maggiore sono già molto avanti su questa strada.

Nonostante le basse temperature, una stella gigante emette più calore perché, in seguito alla sua espansione, ha una superficie assai maggiore. In un futuro molto lontano, quando il sole abbandonerà la sequenza principale, o forse anche un po' prima di allora, emanerà quantità di calore tali da rendere impossibile la vita sulla terra. Il momento, comunque, è ancora lontano qualche miliardo di anni.

Ma cos'è, di preciso, che cambia nel nocciolo di elio della stella, e fa sì che essa diventi, espandendosi, una gigante rossa? Hoyle suggerì che sia lo stesso nocciolo di elio a contrarsi e che, di conseguenza, la sua temperatura salga fino al punto in cui i nuclei di elio possono fondersi, dando origine a carbonio, con ulteriore liberazione d'energia. Nel 1959 il fisico americano David Elmer Alburger dimostrò in laboratorio che questa reazione può effettivamente verificarsi: si tratta di un tipo di reazione molto rara e improbabile, ma gli atomi di elio presenti in una gigante rossa sono talmente numerosi da consentire un numero di fusioni sufficiente a fornire la quantità di energia necessaria.

Hoyle si spinge oltre: la temperatura del nuovo nocciolo di carbonio aumenta ulteriormente, e cominciano a formarsi atomi ancora più complessi, come quelli di ossigeno e di neon. Mentre avvengono queste reazioni, la stella seguita a contrarsi e a scaldarsi, spostandosi nuovamente verso la sequenza principale; intanto nella stella si va formando una serie di strati concentrici, come in una cipolla. C'è il nucleo di ossigeno e neon, poi lo strato di carbonio, quello di elio, e il tutto è avvolto in una «scorza» di idrogeno ancora non convertito.

Tuttavia, mentre come consumatrice di idrogeno la stella ha una lunga vita, per quanto riguarda gli altri combustibili essa si trova come all'inizio di una ripida discesa in toboga. La sua vita non può andare avanti a lungo, perché l'energia prodotta dalla fusione dell'elio e dalle reazioni successive è circa un ventesimo di quella prodotta dalla fusione dell'idrogeno. In un tempo relativamente breve, l'energia necessaria per mantenere dilatata la stella nonostante l'inesorabile effetto del suo stesso campo gravitazionale comincia a scarseggiare, e la stella riprende a contrarsi, sempre più rapidamente; essa si riduce non solo alle dimensioni di una stella normale, ma addirittura a quelle di una nana bianca.

Durante tale contrazione, i suoi strati più esterni possono staccarsi o anche venir scagliati nello spazio con forza, a causa del calore sviluppato dalla contrazione. La nana bianca è in tal caso circondata da un guscio di gas che va espandendosi; all'osservazione telescopica, di tale guscio risaltano i bordi, perché quivi la linea visuale attraversa uno spessore maggiore, e quindi una maggiore quantità, di gas. Tali nane bianche sembrano così avvolte da un piccolo «anello di fumo», o «ciambella» di gas; vengono chiamate "nebulose planetarie", perché l'anello circonda la stella come fosse l'orbita materializzata di un pianeta. Alla fine l'anello di fumo si espande assottigliandosi fino a diventare invisibile, e si hanno delle nane bianche come Sirio B, prive di qualsiasi traccia di nebulosità che le circondi.

La formazione appena descritta delle nane bianche avviene abbastanza tranquillamente: una simile tranquilla «morte» aspetta nel futuro le stelle come il nostro sole e quelle più piccole. Di più, le nane bianche, se non intervengono fattori esterni, hanno la prospettiva di una vita indefinitamente prolungata - una sorta di lungo "rigor mortis" - in cui si raffreddano lentamente, finché, alla fine, non sono più abbastanza calde da risplendere (stiamo parlando di molti miliardi di anni nel futuro); allora possono sopravvivere per altri miliardi e miliardi di anni come "nane nere".

Se invece una nana bianca fa parte di un sistema binario, come Sirio B e Procione B, e se l'altra stella le è molto vicina e appartiene alla sequenza principale, possono verificarsi situazioni molto interessanti. Quando la stella appartenente alla sequenza principale si espande, nel corso del

suo sviluppo evolutivo, una parte della sua massa può venir trascinata verso l'esterno dall'intenso campo gravitazionale della nana bianca, ed entrare in orbita attorno a quest'ultima. Di quando in quando parte di questo materiale orbitante descriverà una spirale raggiungendo la superficie della nana bianca, dove l'attrazione gravitazionale la comprimerà provocandone la fusione, così che essa emetterà un getto di energia. Se poi la quantità di materia che cade sulla superficie della nana bianca è particolarmente ingente, l'emissione di energia potrà essere sufficiente perché noi dalla terra possiamo riuscire a scorgerla, e gli astronomi registreranno l'esistenza di una nova. Naturalmente, questi eventi possono ripetersi più di una volta, e si hanno così le "novae ricorrenti".

Queste però non sono ancora supernovae. E allora, da dove provengono le supernovae? Per rispondere, dobbiamo occuparci di stelle con massa decisamente superiore a quella del nostro sole. Stelle del genere sono piuttosto rare (in tutte le classi di oggetti astronomici gli elementi più grandi sono più rari): ci sarà forse una stella su trenta che ha una massa considerevolmente superiore a quella del sole. Nonostante ciò, nella nostra galassia le stelle con tale caratteristica potrebbero essere 7 miliardi.

Nelle stelle di grande massa il nucleo è più compresso, per l'azione del campo gravitazionale, che è più intenso di quello di una stella più piccola. Pertanto il nucleo è più caldo e le reazioni di fusione possono continuare oltre allo stadio ossigeno-neon delle stelle più piccole. Il neon può combinarsi ulteriormente dando origine al magnesio, che a sua volta può combinarsi formando del silicio, e poi, ancora, del ferro. A uno stadio molto avanzato della sua vita, la stella potrà essere costituita da più di una mezza dozzina di strati concentrici, in ciascuno dei quali viene consumato un combustibile diverso. A questo punto la temperatura al centro può toccare i 3 o 4 miliardi di gradi. Quando la stella comincia a produrre il ferro, ha raggiunto un punto morto, perché gli atomi di ferro costituiscono il punto di massima stabilità e minimo contenuto di energia. Per trasformare gli atomi di ferro sia in atomi più complessi che in atomi più leggeri occorre fornire dell'energia.

Inoltre, all'aumentare nel tempo delle temperature al centro, corrisponde anche l'aumento della pressione di radiazione, che cresce proporzionalmente alla quarta potenza della temperatura. Quando cioè la temperatura raddoppia, la pressione di radiazione aumenta di sedici volte, rendendo sempre più fragile l'equilibrio tra pressione di radiazione e gravitazione. Alla fine le temperature al centro possono raggiungere valori così elevati che, secondo l'ipotesi di Hoyle, gli atomi di ferro si disintegrano in atomi di elio. Perché questo avvenga, però, occorre, come ho appena detto, fornire agli atomi dell'energia. L'unica fonte di energia alla quale la stella può ricorrere è il suo stesso campo gravitazionale. Quando la stella si contrae, si libera dell'energia che può essere usata per convertire il ferro in elio. La quantità di energia necessaria è tuttavia così grande, che la stella deve contrarsi in modo catastrofico, fino a occupare una minima porzione del volume originario, e lo deve fare, sempre secondo Hoyle, circa in un secondo.

Quando una stella siffatta comincia a subire il collasso gravitazionale, il suo nucleo di ferro è ancora circondato da un voluminoso mantello esterno di atomi che non hanno ancora raggiunto il massimo della stabilità. Allorché le regioni esterne subiscono il collasso e la loro temperatura aumenta, queste sostanze che possono ancora combinarsi «prendono fuoco» immediatamente. Ne consegue un'esplosione, che scaglia il materiale esterno della stella lontano dal suo corpo principale. Questa esplosione è una supernova. È stata appunto un'esplosione di questo genere a creare la nebulosa granchio.

La materia scagliata nello spazio in seguito all'esplosione di una supernova ha grande importanza per l'evoluzione dell'universo. Al momento del big bang, si erano formati solo atomi di idrogeno e di elio; altri atomi, più complessi, si sono formati invece nel nucleo delle stelle fino ad arrivare alla complessità del ferro. Senza l'esplosione di supernovae, questi atomi più complessi resterebbero nei nuclei stellari, e infine nelle nane bianche. Solo minime quantità di tali atomi passerebbero nell'universo, soprattutto attraverso gli aloni delle nebulose planetarie.

Nel corso dell'esplosione di una supernova, anche materiale proveniente dagli strati interni della stella viene scagliato con forza nello spazio circostante. L'enorme energia dell'esplosione contribuirebbe anche alla formazione di atomi più complessi di quelli di ferro.

La materia scagliata nello spazio si aggiungerebbe alle nuvole di polvere e gas già presenti, fungendo da materia prima per la formazione di nuove stelle, di "seconda generazione", ricche di ferro e di altri elementi metallici. Anche il nostro sole è probabilmente una stella della seconda generazione, molto più giovane delle vecchie stelle degli ammassi globulari privi di polvere. Le stelle di "prima generazione" contengono invece pochi metalli e molto idrogeno. La terra, formatasi dagli stessi detriti da cui si è formato il sole, è straordinariamente ricca di ferro - ferro che forse un tempo si trovava al centro di una stella esplosa miliardi di anni orsono.

Ma cosa accade alla porzione di stella che si contrae, quando avviene l'esplosione di una supernova? Si forma una nana bianca? Forse che le stelle più grandi e di massa maggiore danno semplicemente origine a nane bianche più grandi e di maggior massa?

Il primo indizio che le cose non potessero andare così, e che non ci si dovesse aspettare di trovare nane bianche sempre più grandi, venne alla luce nel 1939, quando l'astronomo indiano Subrahmanyan Chandrasekhar, che lavorava all'Osservatorio di Yerkes vicino alla baia di Williams, nel Wisconsin, calcolò che nessuna stella avente una massa superiore a 1,4 volte quella del nostro sole (valore che oggi è chiamato "limite di Chandrasekhar") può diventare una nana bianca attraverso il «normale» processo descritto da Hoyle. Ed effettivamente tutte le nane bianche osservate fino a oggi sono risultate di massa inferiore al limite di Chandrasekhar.

La ragione dell'esistenza di tale limite sta nel fatto che le nane bianche non possono contrarsi ulteriormente a causa della mutua repulsione degli elettroni (particelle subatomiche di cui parlerò più avanti, nel capitolo settimo) contenuti nei loro atomi. Al crescere della massa, cresce anche l'intensità della gravitazione; quando la massa è 1,4 volte quella del sole, la repulsione degli elettroni non e più sufficiente e la nana bianca subisce un collasso formando una stella ancora più piccola e più densa, in cui le particelle subatomiche sono praticamente a contatto. Ma per osservare situazioni così estreme si dovette aspettare che fossero disponibili nuovi metodi per sondare l'universo, metodi che ricorressero a radiazioni diverse dalla luce visibile.

LE FINESTRE SULL'UNIVERSO.

Le armi più potenti nella conquista della conoscenza sono l'intelligenza e la curiosità insaziabile che le fa da stimolo.

L'ingegno umano ha continuamente inventato nuovi strumenti, che gli hanno dischiuso orizzonti al di là della portata dei meri organi di senso.

IL TELESCOPIO.

L'esempio più noto è quello dell'invenzione del telescopio, avvenuta nel 1609; essa ha aperto la via a una vera e propria ondata di conoscenze nuove. Il telescopio, in sostanza, è semplicemente un occhio di dimensioni maggiori. A fronte della pupilla dell'occhio umano, larga pochi millimetri, il telescopio di Monte Palomar da 200 pollici ha una superficie di raccolta della luce di più di 200 mila centimetri quadrati. Questo fa sì che le stelle vi appaiano circa un milione di volte più luminose che a occhio nudo. Questo telescopio, entrato in funzione nel 1948, è il più grande esistente oggi negli Stati Uniti; ma nel 1976 l'Unione Sovietica cominciò a effettuare delle osservazioni con un telescopio il cui specchio ha un diametro di 6 metri, installato nelle montagne del Caucaso.

Tale apparecchiatura ha raggiunto quasi il massimo possibile per questo tipo di strumenti; e, a dire il vero, il telescopio sovietico non funziona troppo bene. Esistono, però, altri sistemi per migliorare i telescopi, oltre a quello di costruirli sempre più grandi. Durante gli anni cinquanta

Merle A. Ture ideò uno strumento elettronico per intensificare la debole luce raccolta dal telescopio, triplicandone la potenza. Se si installa un certo numero di telescopi relativamente piccoli che operino in modo coordinato, si possono ottenere immagini equivalenti a quelle prodotte da un unico strumento più grande di ciascuno dei telescopi componenti; tanto gli Stati Uniti che l'Unione Sovietica stanno progettando insiemi di telescopi di questo genere, in grado di superare di gran lunga quelli da 5 e da 6 metri. Inoltre, un grande telescopio messo in orbita intorno alla terra potrebbe scrutare il cielo senza interferenze da parte dell'atmosfera, compiendo osservazioni più chiare di quelle possibili a qualsivoglia telescopio situato sul nostro pianeta. Anche questo progetto è in corso di attuazione.

Ingrandimento dell'immagine e intensificazione della luce non esauriscono però i vantaggi seguiti all'introduzione del telescopio.

Il primo passo per farne qualcosa di più di un semplice collettore della luce è dovuto a Isaac Newton, che nel 1666 scoprì che si poteva scomporre la luce in quello che definì lo "spettro" dei colori. Newton fece passare un raggio di luce solare attraverso un prisma di vetro a sezione triangolare e trovò che il raggio si allargava formando una banda, costituita di luce rossa, arancione, gialla, verde, azzurra e violetta, in cui ogni colore sfumava gradatamente nel successivo. (Il fenomeno in se stesso, naturalmente, è sempre stato conosciuto sotto forma di arcobaleno; questo è dovuto al passaggio della luce solare attraverso gocce di acqua che fungono da minuscoli prismi.)

Quello che Newton aveva dimostrato era che la luce solare, o "luce bianca", è una miscela di molte singole radiazioni (oggi sappiamo che sono onde di diversa lunghezza), che danno all'occhio l'impressione di altrettanti colori differenti. Un prisma separa i colori perché la luce, nel passare prima dall'aria al vetro e poi nuovamente dal vetro all'aria, viene deviata o "rifratta"; ogni lunghezza d'onda subisce una rifrazione diversa: minore è la lunghezza d'onda, maggiore la rifrazione. Le lunghezze d'onda minime, corrispondenti alla luce viola, sono quelle maggiormente rifratte, mentre quelle più lunghe, corrispondenti al rosso, lo sono meno di tutte.

Questo fenomeno spiega, tra l'altro, perché i primi telescopi presentassero un grave inconveniente: gli oggetti visti attraverso di essi erano circondati da anelli colorati, che erano appunto spettri causati dalla dispersione della luce che attraversava le lenti.

Newton disperava che tale difetto potesse venir eliminato, almeno fin quando si fossero usate lenti, di qualsiasi tipo esse fossero.

Pertanto ideò e costruì un "telescopio riflettore", nel quale veniva usato uno specchio parabolico, anziché una lente, per ingrandire l'immagine. La luce, di qualsiasi lunghezza d'onda fosse, subiva la riflessione nella stessa maniera: così non si formavano spettri né anelli di colore (fenomeno questo chiamato "aberrazione cromatica").

Nel 1757 l'ottico inglese John Dollond realizzò delle lenti di due tipi diversi di vetro, ciascuno dei quali compensava la tendenza dell'altro a dar origine a uno spettro. Si poterono così costruire delle lenti "acromatiche", in cui non comparivano cioè frange colorate. Tali lenti riportarono in auge i "telescopi rifrattori". Il più grande strumento di questo tipo, con una lente da 40 pollici (1 metro), si trova nell'Osservatorio di Yerkes e fu costruito nel 1897.

Successivamente non furono costruiti telescopi rifrattori più grandi di questo, e probabilmente non verranno costruiti mai, perché lenti ancora più grandi assorbirebbero tanta luce da annullare il loro superiore potere d'ingrandimento. I telescopi giganti di oggi sono pertanto tutti del tipo a riflessione, perché la superficie riflettente di uno specchio non assorbe troppa luce.

LO SPETTROSCOPIO.

Nel 1814 un ottico tedesco, Joseph von Fraunhofer, compì un ulteriore progresso: fece passare un raggio di luce solare attraverso una stretta fenditura prima di farlo rifrangere in un prisma. Lo spettro così ottenuto era in realtà una serie di immagini della fenditura, ciascuna prodotta dalla luce di una diversa lunghezza d'onda. Le numerosissime immagini della fenditura si

fondevano, formando lo spettro. I prismi di Fraunhofer erano costruiti con tale maestria e producevano immagini della fenditura talmente nitide, che era possibile notare l'assenza di alcune immagini della fenditura stessa; se nella luce solare mancavano determinate lunghezze d'onda, era logico che non si formassero immagini della fenditura in corrispondenza di tali lunghezze d'onda, e che lo spettro del sole contenesse delle righe nere.

Fraunhofer fece una mappa delle posizioni delle righe nere osservate, contandone oltre 700; da allora esse vengono chiamate "righe di Fraunhofer". Nel 1842 le righe dello spettro solare furono fotografate per la prima volta dal fisico francese Alexandre Edmond Becquerel. La fotografia facilitò di molto lo studio degli spettri; grazie agli strumenti moderni, sono state trovate più di 30 mila righe scure nello spettro solare, e di ciascuna è stata misurata la lunghezza d'onda.

Negli anni cinquanta del secolo scorso parecchi scienziati cominciarono a ipotizzare che tali righe fossero caratteristiche dei vari elementi presenti nel sole. Le righe scure dovevano rappresentare l'assorbimento della luce per quelle date lunghezze d'onda da parte di certi elementi, mentre le righe luminose dovevano rappresentare l'emissione della luce caratteristica degli elementi stessi. Verso il 1859 i chimici tedeschi Robert Wilhelm Bunsen e Gustav Robert Kirchhoff elaborarono un sistema per identificare gli elementi in questo modo: essi riscaldavano le varie sostanze fino a renderle incandescenti e a ottenere gli spettri della luce emessa; misuravano la posizione delle righe rispetto a uno spettro di confronto e facevano corrispondere ogni riga a un particolare elemento: in questo caso, si trattava di righe di emissione, cioè luminose contro uno sfondo scuro. Il loro "spettroscopio" venne ben presto applicato alla scoperta di nuovi elementi attraverso la ricerca di righe spettrali nuove, non identificabili con gli elementi noti. Nel giro di un paio di anni, Bunsen e Kirchhoff scoprirono, con questo metodo, il cesio e il rubidio.

Lo spettroscopio venne applicato anche allo studio della luce del sole e delle stelle, e procurò in breve tempo una quantità sorprendente di informazione nuova di natura chimica o di altro genere. Nel 1862 l'astronomo svedese Anders Jonas Angstrom identificò l'idrogeno nel sole, in base alla presenza delle righe spettrali caratteristiche di tale elemento.

L'idrogeno può esser rivelato anche nelle stelle; in complesso, però, gli spettri stellari presentano delle diversità dovute alle differenze di costituzione chimica (nonché di altra natura). In effetti, si possono classificare le stelle in base alla struttura generale della loro configurazione spettrale. Una siffatta classificazione fu elaborata per la prima volta dall'astronomo italiano Pietro Angelo Secchi nel 1867, in base a 4000 spettri. Durante l'ultimo decennio del diciannovesimo secolo l'astronomo americano Edward Charles Pickering studiò decine di migliaia di spettri stellari, raffinandone la classificazione, grazie anche alla meticolosa collaborazione di Annie J. Cannon e Antonia C. Maury.

In origine la classificazione si serviva di lettere maiuscole in ordine alfabetico, ma, quando se ne seppe di più sulle stelle, divenne necessario alterare tale ordine per dare una sistemazione logica alle classi spettrali. Se si dispongono le stelle in ordine di temperatura decrescente, si ha la sequenza O, B, A, F, G, K, M, R, N ed S. Ogni classe può essere ulteriormente suddivisa usando la numerazione da 0 a 9. Il sole è una stella di temperatura media, e la sua classe spettrale è G-0, mentre Alpha Centauri è di classe G-2. Procione, un po' più calda, è di classe F-5, mentre Sirio, decisamente più calda, è di classe A-0.

Se lo spettroscopio era in grado di individuare elementi nuovi sulla terra, doveva poter fare altrettanto nei cieli. Nel 1868 l'astronomo francese Pierre Jules César Janssen osservò un'eclissi totale di sole in India e riferì di aver individuato una riga spettrale che non corrispondeva a nessuna riga prodotta da un elemento noto. L'astronomo inglese Sir Norman Lockyer, sicuro che tale riga indicasse la presenza di un nuovo elemento, lo denominò "elio", dalla parola che in greco significa sole. Sulla terra l'elio non fu identificato che trenta anni dopo.

Infine lo spettroscopio divenne uno strumento capace di misurare la velocità radiale delle stelle, come abbiamo già visto in questo stesso capitolo, e di indagare su molti altri aspetti: le

caratteristiche magnetiche di una stella, la sua temperatura, il fatto che si tratti o meno di una stella doppia, e altro ancora.

Inoltre le righe spettrali risultarono una vera e propria miniera di informazioni sulla struttura atomica, miniera che, però, poté essere utilizzata appropriatamente solo dopo l'ultimo decennio del secolo scorso, quando furono scoperte le particelle subatomiche. Per esempio, nel 1885 il fisico svizzero Johann Jakob Balmer mostrò che l'idrogeno produce una serie di righe disposte a distanze regolari, secondo una formula abbastanza semplice. Questo fatto doveva portare, una generazione dopo, alla formulazione di un importante modello della struttura dell'atomo di idrogeno (vedi capitolo ottavo).

Fu ancora Lockyer a mostrare che le righe spettrali prodotte da un dato elemento cambiano alle alte temperature, fatto che indica qualche cambiamento negli atomi. Anche questa scoperta non fu valutata in tutto il suo significato finché non si capì, più avanti, che l'atomo è costituito di particelle più piccole, alcune delle quali lo abbandonano alle alte temperature, alterando la struttura dell'atomo stesso e la natura delle righe spettrali da esso prodotte. (Tale alterazione delle righe fu scambiata in qualche occasione per una prova dalla presenza di un nuovo elemento, ma purtroppo l'elio è rimasto l'unico caso di elemento nuovo scoperto in cielo.)

LA FOTOGRAFIA.

Dopo che, nel 1830, l'artista francese Louis Jacques Mandé Daguerre produsse i primi "dagherrotipi", dando così vita alla fotografia, anche questa diventò ben presto uno strumento prezioso per l'astronomia. Durante gli anni quaranta del secolo scorso, vari astronomi americani fotografarono la luna e una di queste fotografie, presa da uno di essi, George Phillips Bond, fece sensazione alla Grande Esposizione del 1851 a Londra. Gli astronomi fotografarono anche il sole. Nel 1860 Padre Secchi fece la prima fotografia di un'eclissi totale di sole, e una decina di anni dopo le fotografie delle eclissi avevano consentito di dimostrare che le protuberanze e la corona appartengono al sole e non alla luna.

Nel frattempo, a partire dalla metà dell'Ottocento, gli astronomi avevano cominciato a fotografare anche le stelle lontane. Attorno al 1887 l'astronomo scozzese David Gill fece della fotografia stellare una cosa normale, la quale si avviava ormai a diventare più importante dell'occhio umano nell'osservazione dell'universo.

La tecnica della fotografia con il telescopio migliorò continuamente.

Un grave ostacolo consisteva nel fatto che un grande telescopio può abbracciare solo un campo molto limitato; se si tenta di ampliare tale campo, ai bordi si verificano delle distorsioni. Nel 1930 l'ottico russo-tedesco Bernard Schmidt ideò un metodo per introdurre una lente correttiva che evitasse tali distorsioni. Con questa lente si può fotografare in un sol colpo un'ampia porzione di cielo, il che consente di cercarvi oggetti interessanti, che possono poi essere studiati a fondo con un telescopio ordinario. Dato che un siffatto telescopio viene usato quasi sempre per la fotografia, esso viene chiamato "camera di Schmidt".

Le camere di Schmidt più grandi attualmente in funzione sono quella da 53 pollici di Tautenberg, nella Germania orientale, del 1960, e quella da 48 pollici usata, a Monte Palomar, insieme al telescopio Hale da 200 pollici. La terza in ordine di grandezza è quella da 39 pollici, installata in un osservatorio dell'Armenia sovietica a partire dal 1961.

Intorno al 1800 William Herschel (l'astronomo che per primo fece delle ipotesi sulla forma della nostra galassia) effettuò un esperimento molto interessante, nonostante la sua semplicità. Pose un termometro entro un fascio di luce disperso da un prisma, al di là dell'estremo rosso dello spettro: il mercurio prese a salire! Evidentemente esisteva qualche forma di radiazione invisibile in corrispondenza delle lunghezze d'onda superiori a quelle dello spettro visibile. La radiazione scoperta da Herschel venne chiamata "infrarossa" - al di sotto del rosso; come sappiamo oggi, ben il 60 per cento della radiazione solare è nell'infrarosso.

Nel 1801 il fisico tedesco Johann Wilhelm Ritter stava esplorando l'altro estremo dello spettro, quando scoprì che il nitrato d'argento, che esposto alla luce blu o viola si decompone in argento metallico, annerendo, si decomponeva ancora più rapidamente se lo si metteva al di là dell'estremo violetto dello spettro. Fu così che Ritter scoprì la «luce» che oggi viene chiamata "ultravioletta". Herschel e Ritter avevano quindi allargato lo spettro quale era conosciuto da tanto tempo, avventurandosi in nuovi domini della radiazione.

Questi nuovi domini promettono un'informazione molto ricca: la porzione ultravioletta dello spettro solare, invisibile all'occhio, risalta in ogni particolare nella fotografia. In pratica, se si usa un prisma di quarzo (il quarzo trasmette la luce ultravioletta, mentre il vetro comune ne assorbe la maggior parte), si ottiene uno spettro ultravioletto piuttosto complesso, come per primo mostrò, nel 1852, il fisico britannico George Gabriel Stokes. Purtroppo l'atmosfera trasmette solo il "vicino ultravioletto" - la cui lunghezza d'onda è molto prossima a quella della luce viola. Il "lontano ultravioletto", che corrisponde a lunghezze d'onda più corte, viene assorbito dagli strati superiori dell'atmosfera.

LA RADIOASTRONOMIA.

Nel 1860 il fisico scozzese James Clerk Maxwell elaborò una teoria che prevedeva tutta una famiglia di radiazioni associate ai fenomeni elettrici e magnetici ("radiazione elettromagnetica") - una famiglia di cui la luce ordinaria rappresenta solo una piccola parte. La prima prova chiara a conferma della predizione di Maxwell venne solo un quarto di secolo più tardi, sette anni dopo la sua prematura morte per cancro. Nel 1887 il fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz riuscì a far generare una corrente oscillante da parte della scintilla di una bobina a induzione: in tal modo aveva prodotto e rivelato una radiazione avente lunghezze d'onda molto grandi - molto maggiori di quelle dell'infrarosso. Tali radiazioni furono in seguito chiamate "radioonde".

Le lunghezze d'onda della luce visibile si possono misurare in "micrometri" (milionesimi di metro) e vanno da 0,39 micrometri (estremo violetto) a 0,78 micrometri (estremo rosso); al di là di tale limite inizia il "vicino infrarosso" (da 0,78 a 3 micrometri), poi il "medio infrarosso" (da 3 a 30 micrometri) e infine il "lontano infrarosso" (da 30 a 1000 micrometri). È qui che cominciano le onde radio: le cosiddette "microonde" vanno da 1000 a 160 mila micrometri e le onde lunghe arrivano a molti miliardi di micrometri.

La radiazione può essere caratterizzata, oltre che dalla lunghezza d'onda, anche dalla "frequenza", che è il numero di onde prodotte ogni secondo. Questo numero è talmente alto per la luce visibile e l'infrarosso che non viene solitamente molto usato in questi casi; per le onde radio, invece, il valore della frequenza è espresso da numeri meno proibitivi, e diventa utile ricorrervi. Un migliaio di oscillazioni al secondo corrisponde a 1 "kilociclo", mentre un milione di oscillazioni al secondo è un "megaciclo". La regione delle microonde va da 300 mila megacicli a 1000 megacicli. Le radioonde usate dalle normali stazioni radio, molto più lunghe, sono comprese nell'intervallo dei kilocicli.

Non erano passati dieci anni dalla scoperta di Hertz e anche l'altro estremo dello spettro aveva subìto un analogo ampliamento: nel 1895 il fisico tedesco Wilhelm Konrad Roentgen scoprì accidentalmente una misteriosa radiazione che chiamò "raggi X". Si trovò che essa aveva lunghezze d'onda inferiori a quelle dell'ultravioletto. Ancora più tardi Rutherford dimostrò che i "raggi gamma", associati alla radioattività, avevano lunghezze d'onda ancora inferiori a quelle dei raggi X.

La parte dello spettro con le brevi lunghezze d'onda è oggi suddivisa all'incirca così: le lunghezze d'onda da 0,39 a 0,17 micrometri appartengono al vicino ultravioletto, quelle da 0,17 a 0,01 micrometri al lontano ultravioletto, quelle da 0,01 a 0,00001 micrometri ai raggi X; i raggi gamma vanno da questo punto a meno di un miliardesimo di micrometro.

Lo spettro originario di Newton si era dunque allargato enormemente.

Se immaginiamo che ogni raddoppio di lunghezza d'onda equivalga a 1 ottava (come nel caso del suono), l'intera gamma fino a oggi studiata dello spettro elettromagnetico comprende quasi 60 ottave; la luce visibile occupa soltanto 1 ottava, vicino al centro dello spettro.

Questo ampliamento dello spettro ci ha permesso, naturalmente, di avere una visione più completa delle stelle. Sappiamo, per esempio, che la luce solare è ricca di ultravioletti e di infrarossi. La nostra atmosfera blocca la maggior parte di queste radiazioni; ma nel 1931 fu scoperta, del tutto casualmente, una finestra radio che ci permette di affacciarci sull'universo.

Karl Jansky, un giovane radioingegnere dei Bell Telephone Laboratories, che stava studiando i disturbi di origine elettrostatica che accompagnano sempre la ricezione radio, si imbatté in un rumore molto debole e molto costante, che non poteva provenire da alcuna delle sorgenti note, e finì per concludere che esso era causato da radioonde che provenivano dallo spazio esterno.

All'inizio i segnali radio provenienti dallo spazio sembravano più forti in direzione del sole; ma giorno dopo giorno la direzione in cui il segnale era più forte si andava allontanando dal sole, descrivendo un arco nel cielo. Nel 1933 Jansky arrivò alla conclusione che le onde radio provenivano dalla Via Lattea, in particolare dalla direzione del Sagittario, che è quella del centro della galassia.

Era nata così la "radioastronomia": gli astronomi non vi si dedicarono subito a fondo a causa di alcuni seri inconvenienti: anziché immagini nitide, essa forniva ghirigori di difficile interpretazione. Più importante ancora, le onde radio erano troppo lunghe per consentire la risoluzione di una sorgente piccola come una stella. I radiosegnali provenienti dallo spazio avevano lunghezze d'onda centinaia di migliaia e perfino milioni di volte maggiori di quelle della luce visibile: una normale radioricevente poteva dare, al massimo, una generica idea della loro provenienza. Un radiotelescopio avrebbe dovuto avere un paraboloide ricevente grande un milione di volte più dello specchio di un telescopio ottico, se si voleva avere un'immagine nitida del cielo. Un radiotelescopio equivalente al telescopio da 200 pollici avrebbe dovuto avere un diametro di 5000 chilometri e una superficie doppia di quella degli Stati Uniti - cosa manifestamente impossibile.

Queste difficoltà misero in ombra l'importanza della nuova scoperta; ma un giovane radioamatore, Grote Reber, andò avanti nella ricerca, senza nessun'altra ragione tranne la personale curiosità. Nel 1937 spese tempo e danaro per costruire nel suo cortile un piccolo radiotelescopio, con una antenna parabolica del diametro di circa 9 metri, per ricevere e concentrare le radioonde. A partire dal 1938 scoprì parecchie sorgenti di radioonde oltre a quella del Sagittario - una nella costellazione del Cigno, per esempio, e un'altra in Cassiopea. (In un primo tempo queste sorgenti di radiazione vennero chiamate "radiostelle", che fossero o meno effettivamente stelle, ma oggi vengono solitamente chiamate "radiosorgenti".)

Durante la seconda guerra mondiale gli scienziati inglesi, mentre mettevano a punto il radar, scoprirono che il sole interferiva emettendo segnali nella regione delle microonde. Ciò suscitò il loro interesse per la radioastronomia; dopo la guerra gli inglesi portarono avanti lo studio delle radioonde solari. Nel 1950 scoprirono che molti dei radiosegnali emessi dal sole erano associati alle macchie solari. (Jansky aveva condotto i suoi esperimenti in un periodo di attività minima delle macchie, ed è questa la ragione per cui aveva scoperto la radiazione galattica, anziché quella solare.)

Cosa ancora più importante, poiché la tecnologia del radar faceva uso delle stesse lunghezze d'onda della radioastronomia, alla fine della seconda guerra mondiale gli astronomi potevano contare su un ampio repertorio di strumenti capaci di operare con le microonde, che prima della guerra non esistevano, e che vennero rapidamente perfezionati.

L'interesse per la radioastronomia, così, fece un balzo in avanti.

Gli inglesi furono i primi a costruire grandi antenne per migliorare la ricezione e localizzare con grande precisione le radiostelle. Il paraboloide da 75 metri di Jodrell Bank, in Inghilterra, costruito sotto la supervisione di Sir Bernard Lovell, fu il primo radiotelescopio veramente grande.

Si trovarono dei sistemi per migliorare la ricezione. Non era necessario costruire dei telescopi di grandezza irrealizzabile per ottenere un'alta risoluzione. Si potevano invece costruire in un dato luogo un radiotelescopio di dimensioni normali, e un altro a grande distanza dal primo. Se si sincronizzano i due strumenti mediante sofisticati orologi atomici, e li si fanno muovere all'unisono con un sistema computerizzato, si ottengono dalla coppia di radiotelescopi dei risultati simili a quelli prodotti da un unico grande radiotelescopio di dimensioni pari alla distanza che li separa. I radiotelescopi collegati in tale modo vengono chiamati a "grande (o grandissima) base". Furono gli astronomi australiani i pionieri in questo progresso: essi infatti disponevano di grandi estensioni di territorio relativamente disabitato; oggi esistono radiotelescopi sincronizzati che cooperano dalla California all'Australia, con una base di più di diecimila chilometri.

Dunque non è più vero che i radiotelescopi producano immagini sfocate, molto inferiori a quelle nitide prodotte dai telescopi ottici; al contrario, essi possono fornire maggiori dettagli di questi ultimi.

Certo, gli strumenti odierni della radioastronomia hanno raggiunto il massimo ottenibile stando sulla superficie terrestre, ma gli astronomi già sognano radiotelescopi nello spazio, collegati tra loro e con quelli situati sulla terra, che forniscano basi di gran lunga maggiori.

Tuttavia, i radiotelescopi hanno permesso di fare importanti scoperte anche prima di venir perfezionati fino al livello attuale. Nel 1947 l'astronomo australiano John C. Bolton riuscì a localizzare la terza radiosorgente del cielo in ordine di intensità, che risultò altro non essere che la nebulosa granchio. Delle radiosorgenti rivelate qua e là nel cielo, questa fu la prima che poté essere identificata con uno specifico oggetto visibile. Non sembrava probabile che una stella desse origine a una radiazione tanto intensa, a differenza delle altre stelle; era molto più probabile che la sorgente fosse la nube di gas in espansione della nebulosa.

Questa scoperta avvalorò altri dati che indicavano che i radiosegnali cosmici provenivano primariamente da gas turbolenti. È il gas turbolento dell'atmosfera esterna del sole a dar origine alle radioonde, per cui quello che vien chiamato radiosole è molto più ampio del sole visibile. In seguito si è trovato che anche Giove, Saturno e Venere, ciascuno dei quali possiede un'atmosfera turbolenta, sono radioemittenti.

Jansky, che aveva dato inizio a tutta la vicenda, restò pressoché ignorato durante la sua vita e morì nel 1950 all'età di 44 anni, proprio nel momento in cui la radioastronomia stava decollando. Gli fu tributato un riconoscimento postumo: oggi l'intensità della radioemissione viene misurata in "jansky".

AL DI LÀ DELLA NOSTRA GALASSIA.

La radioastronomia si avventurò nello studio dello spazio profondo.

All'interno della nostra galassia, vi è una forte radiosorgente (la più forte esistente esternamente al sistema solare), chiamata Cas A perché situata in Cassiopea. Walter Baade e Rudolph Minkowski, a Monte Palomar, diressero il telescopio da 200 pollici sul punto in cui era stata localizzata la sorgente dai radiotelescopi inglesi, e trovarono dei filamenti di gas turbolento. È possibile che si tratti di residui della supernova del 1572, osservata da Tycho Brahe appunto in Cassiopea.

Una scoperta a distanze ancora maggiori fu fatta nel 1951. La seconda radiosorgente per intensità si trova nella costellazione del Cigno. Reber ne aveva riferito per primo, nel 1944. Quando, in seguito, i radiotelescopi ne migliorarono la localizzazione, divenne evidente che questa radiosorgente era esterna alla nostra galassia: fu questa la prima localizzazione al di fuori della Via Lattea. Poi, nel 1951, Baade, studiando quella stessa porzione di cielo con il telescopio da 200 pollici, trovò al centro del campo una strana galassia, che aveva due centri e appariva deformata. Baade sospettò immediatamente che questo strano oggetto non fosse una sola galassia, ma due, accostate come una coppia di piatti nel momento in cui vengono fatti suonare, e che in realtà si

trattasse di due galassie in collisione - una possibilità che già egli aveva discusso con altri astronomi. Sembrò che ulteriori prove confermassero la sua intuizione, e, per un certo tempo, si accettò come un fatto assodato l'esistenza di galassie in collisione. Dato che quasi tutte le galassie fanno parte di ammassi abbastanza densi, in cui si muovono come api in uno sciame, tali collisioni non apparivano tanto improbabili.

Si arrivò alla conclusione che la radiosorgente nel Cigno fosse a 260 milioni di anni luce di distanza; tuttavia, i radiosegnali erano più forti di quelli della nebulosa granchio, che si trova relativamente vicina a noi. Questa fu la prima indicazione che i radiotelescopi potevano spingersi a distanze maggiori di quelle raggiunte dai telescopi ottici; perfino il radiotelescopio da 75 metri di Jodrell Bank, molto piccolo in confronto a quelli odierni, poteva superare il telescopio ottico da 200 pollici.

Eppure, via via che il numero delle radiosorgenti scoperte nelle galassie lontane cresceva, superando il centinaio, gli astronomi si sentivano sempre più a disagio. Di sicuro non era possibile che fossero tutte dovute a galassie in collisione: sarebbe stata davvero una cosa troppo improbabile.

Anzi, la stessa idea delle collisioni galattiche cominciò a vacillare.

L'astrofisico sovietico Victor Amazaspovic' Ambartsumian avanzò nel 1955 delle argomentazioni teoriche che facevano supporre che, anziché collidere, le radiogalassie stessero esplodendo.

Questa possibilità venne ulteriormente rafforzata dalla scoperta, nel 1963, che la galassia M 82, nella costellazione dell'Orsa Maggiore (una forte radiosorgente, lontana circa 10 milioni di anni luce), è una di queste "galassie in corso di esplosione".

Dall'analisi di M 82 con il telescopio Hale da 200 pollici a una particolare lunghezza d'onda, risultarono ingenti getti di materia, che raggiungevano una lunghezza di 1000 anni luce emergendo dal nucleo della galassia. A giudicare dalla quantità di materia che esplode verso l'esterno, dalla distanza fino a cui è stata scagliata, e dalla velocità con cui si sposta, sembra probabile che l'esplosione sia avvenuta circa 1milione 500 mila anni orsono.

Oggi si pensa che i nuclei delle galassie siano in generale attivi, e che in essi si verifichino eventi caratterizzati da turbolenza e da estrema violenza; l'universo sarebbe dunque un luogo assai meno tranquillo di quanto non pensassimo prima dell'avvento della radioastronomia. L'apparente serenità assoluta dei cieli contemplati a occhio nudo altro non è che la conseguenza dei limiti della nostra vista (che riesce a scorgere solo le stelle dei nostri pacifici dintorni), e che abbraccia un tempo molto limitato.

Perfino al centro della nostra stessa galassia vi è una piccolissima regione, del diametro al massimo di qualche anno luce, che è una radiosorgente intensamente attiva.

Va però aggiunto che il fatto che esistano galassie che stanno esplodendo, e che sia cosa comune - anzi forse universale - l'attività dei nuclei galattici, non deve necessariamente screditare in modo definitivo il concetto di collisione tra galassie. Sembra probabile che in ogni ammasso di galassie quelle più grandi crescano a spese di quelle più piccole; spesso ve ne è una considerevolmente più grande di tutte le altre dell'ammasso. Alcuni indizi fanno pensare che questa abbia raggiunto le sue dimensioni in seguito alle collisioni con galassie più piccole, che avrebbe assorbito. È stata fotografata una grande galassia che mostra segni di parecchi nuclei distinti, di cui solo uno appare suo, mentre gli altri facevano parte un tempo di galassie indipendenti. È così che si è cominciato a parlare di "galassie cannibali".

I NUOVI OGGETTI.

Negli anni sessanta gli astronomi avrebbero potuto facilmente credere che ormai vi fossero poche sorprese in serbo tra gli oggetti fisici dei cieli. Certo, potevano venire nuove teorie e nuove concezioni, ma sicuramente non c'era da aspettarsi di scoprire nuove sorprendenti varietà di stelle,

di galassie, o di qualsiasi altra cosa, dopo tre secoli di osservazione effettuata con strumenti sempre più raffinati.

Agli astronomi che nutrivano questa opinione erano riservati tremendi shock - il primo dei quali fu il risultato di un'indagine su certe radiosorgenti che apparivano insolite, ma non sorprendenti.

LE QUASAR.

Le radiosorgenti studiate per prime nello spazio profondo sembravano essere connesse alla presenza di estesi corpi di gas turbolenti: la nebulosa granchio, le galassie distanti e così via. Tuttavia, vi erano alcune radiosorgenti che apparivano singolarmente piccole. Con il perfezionamento dei radiotelescopi e con il miglioramento della conoscenza delle radiosorgenti, cominciò ad apparire possibile che l'emissione delle radioonde fosse dovuta a singole stelle.

Tra queste radiosorgenti compatte vi erano quelle note come 3C48, 3C147, 3C196, 3C273 e 3C286. La sigla 3C si riferisce al Terzo catalogo di radiosorgenti di Cambridge; si tratta di un elenco compilato dall'astronomo inglese Martin Ryle e dai suoi collaboratori; i numeri che seguono indicano la posizione della sorgente nel catalogo.

Nel 1960 l'astronomo americano Allen Sandage passò al vaglio con il telescopio da 200 pollici le zone che contenevano queste radiosorgenti compatte, e in tutti i casi esaminati sembrò che una stella fosse effettivamente all'origine del fenomeno. La prima di queste stelle a essere scoperta fu quella associata a 3C48; nel caso di 3C273, il più luminoso degli oggetti, la posizione esatta fu individuata, in Australia, da Cyril Hazard che registrò l'interruzione del segnale radio al momento dell'occultamento da parte della luna.

Le stelle interessate comparivano già in mappe fotografiche anteriori del cielo; si era sempre pensato che fossero semplicemente oggetti poco luminosi della nostra galassia. Ma ora la loro insolita radioemissione stimolò nuove e accurate fotografie, che mostrarono che c'era dell'altro. Deboli nebulosità risultarono associate ad alcuni degli oggetti; inoltre sembrava che un piccolo getto di materia uscisse da 3C273. In realtà erano due le radiosorgenti connesse a 3C273: una era localizzata nella stella, l'altra nel getto. Un altro punto interessante emerso da questa indagine approfondita fu l'insolita abbondanza di luce ultravioletta emessa da queste stelle.

Si cominciò allora a sospettare che le radiosorgenti compatte, benché simili a stelle, potessero malgrado tutto non essere delle stelle comuni. Alla fine, si arrivò a chiamarle "radiosorgenti quasi-stellari"; ma poiché questa macchinosa espressione veniva usata sempre più spesso dagli astronomi, nel 1964 venne abbreviata dal fisico sino-americano Hong Yee Chiu in "quasar", parola che si è ormai stabilmente insediata nel vocabolario dell'astronomia.

Era evidente che le quasar erano oggetti piuttosto interessanti, degni di essere studiati con l'intera gamma delle tecniche astronomiche, compresa la spettroscopia. Astronomi come Allen Sandage, Jesse L. Greenstein e Maarten Schmidt lavorarono duramente per ottenerne gli spettri. Quando la cosa fu ultimata, nel 1960, si trovarono in mano delle strane righe che non sapevano identificare, e che, oltretutto, differivano da una quasar all'altra.

Nel 1963 Schmidt ritornò allo spettro di 3C273, che era il più chiaro di tutti, essendo 3C273 il più luminoso di questi oggetti sconcertanti. Vi erano presenti sei righe, quattro delle quali erano distanziate in modo tale da ricordare una serie spettrale dell'idrogeno; se non che non avrebbe dovuto esserci nessuna serie del genere nella posizione in cui si trovavano. Ma non poteva darsi che le righe dovessero essere collocate altrove, ma avessero subito uno spostamento verso il rosso? In tal caso, doveva trattarsi di un notevole spostamento, tale da indicare che la recessione avveniva a una velocità superiore a 40 mila chilometri al secondo. Questo fatto sembrava incredibile; eppure, se si ammetteva un simile spostamento, diventava possibile identificare anche le altre due righe: una rappresentava l'ossigeno due volte ionizzato, cioè privo di due elettroni, l'altra il magnesio privo di due elettroni.

Schmidt e Greenstein studiarono allora gli spettri delle altre quasar, e anche in questo caso riuscirono a identificarne le righe, supponendo che ci fosse stato un fortissimo spostamento verso il rosso.

Questi enormi spostamenti avrebbero potuto avere come causa l'espansione generale dell'universo; ma applicando la legge di Hubble per correlare lo spostamento verso il rosso con la distanza, si trovò che le quasar non potevano assolutamente essere stelle normali della nostra galassia; dovevano essere tra gli oggetti più lontani che conosciamo - distanti miliardi di anni luce.

Verso la fine degli anni sessanta una ricerca intensiva aveva portato alla scoperta di 150 quasar. Di circa 110 di esse vennero studiati gli spettri, ognuno dei quali mostrò un grande spostamento verso il rosso - in effetti superiore a quello di 3C273. Per un paio di esse è stata stimata una distanza di 9 miliardi di anni luce.

Se le quasar sono davvero tanto lontane quanto appaiono in base allo spostamento verso il rosso, gli astronomi si trovano di fronte ad alcuni problemi decisamente difficili e inquietanti. Tanto per cominciare, queste quasar devono essere straordinariamente luminose per apparire come appaiono a una così grande distanza; addirittura, dovrebbero avere una luminosità da 30 a 100 volte quella di un'intera galassia ordinaria.

Ma, se ciò è vero, e se le quasar hanno forma e aspetto di una galassia, dovrebbero contenere un numero di stelle anche 100 volte superiore a quello di una galassia ordinaria, e avere ciascuna dimensione da 5 a 6 volte maggiore. Quindi, anche a quelle enormi distanze dovrebbero nettamente apparire nei grandi telescopi come macchie ovali di luce, cosa che non accade; esse infatti restano dei punti luminosi simili a stelle anche nel più grande dei telescopi; quindi, nonostante la loro eccezionale luminosità, potrebbero essere assai più piccole delle galassie ordinarie.

Un ulteriore fenomeno rafforzò l'idea che le loro dimensioni fossero ridotte: fin dal 1963 si era scoperto che l'energia emessa dalle quasar era variabile, tanto nella regione della luce visibile quanto nella regione delle radioonde. Nel giro di pochi anni si erano potuti registrare aumenti o diminuzioni che arrivavano fino a tre magnitudini.

Per presentare variazioni cosi grandi della radiazione in tempi così brevi, un corpo deve essere piccolo. Modeste variazioni potrebbero avere come causa un aumento o una diminuzione della luminosità di regioni ristrette del corpo, ma grandi variazioni devono interessare il corpo nella sua totalità. Ma allora ci dovrebbe essere qualche azione che si propaga attraverso tutto il corpo durante il periodo della variazione; nessuna azione fisica, però, può viaggiare più velocemente della luce; pertanto, se una quasar presenta variazioni rilevanti nell'arco di qualche anno, non potrà avere un diametro molto superiore a un anno luce. In effetti, certi calcoli fanno pensare che il diametro delle quasar possa essere di solo un mese luce, pari a circa 800 miliardi di chilometri.

Corpi tanto piccoli e insieme tanto luminosi devono consumare la loro energia a un ritmo talmente elevato che le riserve non possono durare a lungo (a meno che non vi sia una sorgente di energia di cui non sospettiamo neppure l'esistenza, cosa non del tutto impossibile).

Secondo alcuni calcoli, una quasar può andare avanti a liberare energia a questi ritmi impressionanti solo per qualche milione di anni. Se questo è vero, le quasar che vediamo oggi lo sono diventate solo poco tempo fa (poco tempo su scala cosmologica), e devono esistere degli oggetti che un tempo erano quasar ma oggi non lo sono più.

Sandage, nel 1965, annunciò la scoperta di oggetti che potrebbero effettivamente essere vecchie quasar. Essi sembravano ordinarie stelle azzurrognole, ma presentavano un grande spostamento verso il rosso, proprio come le quasar. Erano altrettanto lontani, luminosi e piccoli delle quasar, ma risultavano privi di radioemissione. Sandage li chiamò "oggetti stellari blu", denominazione che viene abbreviata nella sigla B.S.O.

Sembra che i B.S.O. siano più numerosi delle quasar; secondo una stima del 1967, il numero totale dei B.S.O. alla portata dei nostri telescopi sarebbe di 100 mila. Vi sono molti più B.S.O. che quasar, perché un corpo rimane molto più a lungo sotto forma di B.S.O. che sotto forma di quasar.

La convinzione che le quasar siano oggetti molto distanti non è condivisa da tutti gli astronomi. Vi è la possibilità che gli enormi spostamenti verso il rosso delle quasar non siano di origine "cosmologica", cioè che non siano una conseguenza dell'espansione generale dell'universo; e che le quasar siano, piuttosto, oggetti relativamente vicini che stanno allontanandosi a grande velocità da noi per qualche causa locale - per esempio, per essere stati espulsi con una velocità elevatissima da un nucleo galattico.

Il più convinto sostenitore di questa teoria è l'astronomo americano Halton C. Arp, che ha discusso alcuni casi di quasar che sembrano fisicamente connesse con galassie vicine. Poiché queste ultime presentano uno spostamento verso il rosso relativamente limitato, il fatto che le quasar ne presentino uno tanto maggiore (pur essendo, secondo questa ipotesi, alla stessa distanza delle galassie) non può imputarsi a cause cosmologiche.

Un altro enigma è sorto verso la fine degli anni settanta, quando si è scoperto che le radiosorgenti all'interno delle quasar (che oggi è possibile localizzare singolarmente grazie ai moderni radiotelescopi a grande base) sembrano separarsi a velocità che sono varie volte maggiori di quella della luce. Superare la velocità della luce è cosa impossibile secondo le teorie fisiche attuali; ma una siffatta «velocità superluminale» esisterebbe solo se le quasar sono davvero così lontane come si pensa. Se invece sono più vicine, la velocità apparente di separazione corrisponderebbe a velocità effettive inferiori a quelle della luce.

Tuttavia, l'idea che le quasar siano relativamente vicine (il che significherebbe anche che sono meno luminose e quindi producono meno energia, e risolverebbe uno dei tanti problemi che le riguardano) non ha persuaso la maggior parte degli astronomi. La convinzione più diffusa è che i dati in favore del fatto che le quasar si trovino a distanze cosmologiche sono schiaccianti, mentre i dati presentati da Arp per sostenere l'esistenza di connessioni fisiche non sono abbastanza convincenti; quanto alle velocità apparentemente superiori a quella della luce, sarebbero l'effetto di un'illusione ottica (di cui sono già state proposte varie spiegazioni plausibili).

Ma se le quasar sono davvero tanto lontane quanto fa credere il loro "red shift", se sono davvero tanto piccole eppure così luminose e ricche di energia, come si deve ammettere se si accettano tali distanze, cosa sono mai?

La risposta più probabile ci riporta al 1943, quando l'astronomo americano Carl Seyfert osservò una strana galassia, con un nucleo molto luminoso e molto piccolo. Altre galassie di questo genere sono state osservate in seguito; oggi le galassie di questo gruppo vengono chiamate "galassie di Seyfert". Alla fine degli anni sessanta se ne conosceva solo una dozzina, ma vi è ragione di sospettare che circa l'1 per cento di tutte le galassie possa essere del tipo Seyfert.

Potrebbe darsi che le galassie di Seyfert siano qualcosa a metà strada tra le galassie ordinarie e le quasar? I loro nuclei luminosi presentano modeste variazioni di luminosità che potrebbero indicare che essi sono quasi altrettanto piccoli come le quasar; se la luminosità di tali nuclei aumentasse ulteriormente, e quella del resto della galassia diminuisse, la galassia diventerebbe indistinguibile da una quasar; anzi una delle galassie di Seyfert, 3C120, è veramente molto simile a una quasar.

Le galassie di Seyfert presentano limitati spostamenti verso il rosso e non si trovano a enormi distanze. Forse allora le quasar sono galassie di Seyfert che si trovano a grandissima distanza - al punto che noi riusciamo a scorgerne soltanto il piccolo nucleo luminoso e ad avvistare solo le più grandi tra esse, che ci fanno così pensare che le quasar siano eccezionalmente luminose, mentre dovremmo sospettare che siano galassie di Seyfert molto grandi, che riusciamo a vedere nonostante la loro distanza.

In effetti, fotografie recenti hanno mostrato segni di nebulosità intorno alle quasar, il che sembrerebbe indicare la presenza di una galassia oscura che circonda un centro piccolo, attivo e molto luminoso. Presumibilmente, allora, le regioni più lontane dell'universo, al di là di un miliardo di anni luce, sono popolate di galassie, proprio come le regioni più vicine. Nella maggior parte dei

casi tali galassie, però, sono di gran lunga troppo fioche perché riusciamo ad avvistarle otticamente, così che vediamo solo il centro luminoso di quelle tra loro che sono più grandi e più attive.

LE STELLE DI NEUTRONI.

Se le onde radio hanno portato alla scoperta delle quasar, questi strani e sconcertanti oggetti astronomici, la ricerca all'estremo opposto dello spettro ha suggerito l'esistenza di altri oggetti altrettanto singolari.

Nel 1958 l'astrofisico americano Herbert Friedman scoprì che il sole produce una notevole quantità di raggi. Essi non possono essere rivelati dalla superficie della terra, perché vengono assorbiti dall'atmosfera; ma razzi lanciati oltre l'atmosfera e muniti di strumenti adatti possono facilmente rivelarne la presenza.

Per qualche tempo rimase un enigma quale fosse la sorgente dei raggi X solari. La temperatura della superficie del sole non supera i 6000 gradi C - abbastanza elevata per far evaporare qualsiasi forma di materia, ma non abbastanza per produrre raggi X. La sorgente doveva trovarsi nella corona solare, un tenue alone di gas che si estende attorno al sole in tutte le direzioni per milioni di chilometri. Pur emettendo almeno la metà della luce della luna piena, la corona è completamente mascherata dalla luce del sole, e risulta visibile solo durante le eclissi, almeno in circostanze ordinarie. Nel 1930 l'astronomo francese Bernard Ferdinand Lyot aveva inventato un telescopio che, ad alte quote e in giornate limpide, permetteva di osservare la corona interna anche se non vi era eclissi in corso.

Si era pensato che la corona fosse la sorgente dei raggi X, perché, anche prima delle osservazioni condotte mediante i razzi, si sospettava che la sua temperatura fosse particolarmente elevata. Lo studio dello spettro della corona (durante le eclissi) aveva mostrato delle righe che non potevano esser poste in relazione con alcun elemento noto. Si ipotizzò l'esistenza di un nuovo elemento, che venne chiamato "coronio". Nel 1941, però, si scoprì che le righe del coronio possono esser prodotte da atomi di ferro che abbiano perso molte particelle subatomiche, cosa che però richiede temperature sul milione di gradi, certamente sufficienti quindi per produrre raggi X.

Quando si verifica nella corona un brillamento, l'emissione di raggi X aumenta di colpo, raggiungendo un'intensità che implica una temperatura della corona, al di sopra del brillamento, di 100 milioni di gradi. La ragione per cui i gas rarefatti della corona raggiungono temperature così elevate è tuttora oggetto di dibattito. (In questo caso è indispensabile distinguere tra temperatura e calore; la temperatura costituisce una misura dell'energia cinetica degli atomi o delle particelle del gas, ma, dato il loro basso numero, la quantità di calore per unità di volume è modesta. I raggi X sono prodotti dalle collisioni tra queste particelle con energie estremamente elevate.)

I raggi X provengono anche da sorgenti situate al di fuori del sistema solare. Nel 1963 Bruno Rossi e altri astronomi lanciarono degli strumenti a bordo di razzi, allo scopo di appurare se la superficie lunare rifletteva i raggi X emessi dal sole. Da questa ricerca risultò, invece, un'altra cosa: la scoperta di due sorgenti particolarmente intense di raggi X in altre parti del cielo. La più debole delle due (Tau X-1, perché si trova nella costellazione del Toro) venne ben presto posta in relazione con la nebulosa granchio.

Nel 1966 si scoprì che quella più forte, Sco X-1 (situata nella costellazione dello Scorpione), era associata a un oggetto ottico che sembrava essere il residuo di una nova (analogamente alla nebulosa granchio). In seguito sono state scoperte nel cielo molte altre sorgenti di raggi X).

Per emettere gli energetici raggi X con un'intensità sufficiente perché essi siano osservabili a distanze interstellari, una sorgente deve avere temperatura estremamente elevata e grande massa.

L'intensità dei raggi X emessi dalla corona solare non sarebbe certo sufficiente. Per soddisfare i requisiti della grande massa e della temperatura elevatissima, si pensò a qualcosa di più denso ed estremo perfino di una nana bianca. Già nel 1934, Zwicky aveva avanzato l'idea che le particelle subatomiche di una nana bianca potessero, in certe condizioni, combinarsi dando luogo a

particelle prive di carica chiamate "neutroni", che in seguito avrebbero potuto essere costrette ad avvicinarsi fino a entrare in contatto reciproco. Il risultato sarebbe stato una sfera del diametro di non più di 15 chilometri, che però avrebbe conservato tutta la massa della stella. Nel 1939 le proprietà di una siffatta "stella di neutroni" furono studiate a fondo dal fisico americano J. Robert Oppenheimer; un oggetto del genere raggiungerebbe una temperatura superficiale così elevata, almeno negli stadi iniziali successivi alla sua formazione, da emettere raggi X a profusione.

La ricerca di Friedman di qualche prova diretta dell'esistenza di queste stelle di neutroni si concentrò sulla nebulosa granchio, con l'idea che la tremenda esplosione che l'aveva originata potesse aver lasciato come residuo non semplicemente una nana bianca densa, ma una stella di neutroni superdensa; nel luglio del 1964 la luna passò davanti alla nebulosa granchio e venne lanciato un razzo al di fuori dell'atmosfera per registrare l'emissione di raggi X. Se tale emissione proveniva da una stella di neutroni, doveva risultare completamente e bruscamente interrotta al passaggio della luna davanti al piccolo oggetto. Se invece l'emissione dei raggi X proveniva genericamente da tutta la nebulosa granchio, doveva diminuire gradualmente via via che la luna eclissava la nebulosa. Fu la seconda ipotesi a rivelarsi giusta, e la nebulosa granchio apparve semplicemente una corona più grande e molto più intensa.

Per un momento la possibilità che potessero davvero esistere ed essere avvistate delle stelle di neutroni sembrò svanire; ma, nello stesso anno in cui il test della nebulosa granchio aveva dato esito negativo, venne fatta una scoperta in un'altra direzione. Le radioonde di certe sorgenti sembravano indicare una fluttuazione d'intensità molto rapida. Era come se qua e là vi fossero degli «scintillii» radio.

Gli astronomi idearono rapidamente degli strumenti capaci di intercettare impulsi di onde radio molto brevi, pensando che ciò avrebbe consentito uno studio più approfondito di queste rapide variazioni. Uno degli astronomi che ricorse a un radiotelescopio del genere fu Anthony Hewish dell'Osservatorio della Cambridge University; egli diresse l'installazione di 2048 apparecchi riceventi distinti distribuiti su un'area di poco più di un ettaro, e, nel luglio del 1967, lo strumento entrò in funzione.

Di lì a un mese un giovane laureato inglese, Jocelyn Bell, mentre era ai comandi, rivelò impulsi di radioonde provenienti da una posizione a mezza strada tra Vega e Altair. Non erano difficili da captare e avrebbero potuto essere scoperti anni prima, se gli astronomi si fossero aspettati di trovare questi brevi impulsi e avessero ideato le apparecchiature adatte per rivelarli. Gli impulsi erano sorprendentemente brevi, della durata di solo un trentesimo di secondo. Ancora più strano era il fatto che essi si susseguivano con straordinaria regolarità a intervalli di 1,33 secondi. Gli intervalli erano così regolari, anzi, che fu possibile calcolare il periodo con un'approssimazione di un centomilionesimo di secondo, arrivando a stabilire che era di 1,33730109 secondi.

Naturalmente non vi era modo di sapere, almeno in un primo tempo, che cosa significassero questi impulsi. Hewish riuscì solo ad associarli all'idea di una "stella pulsante", che a ogni pulsazione emettesse un impulso di energia. Questa denominazione venne quasi subito abbreviata in quella di "pulsar", e così da allora viene chiamato il nuovo oggetto.

Si dovrebbe però parlarne al plurale, perché Hewish si mise subito alla ricerca di altri oggetti simili. Nel febbraio del 1968, quando annunciò la sua scoperta, ne aveva individuati quattro; per questi risultati ricevette più tardi, nel 1974, insieme ad altri, il premio Nobel per la fisica. Altri astronomi si misero alla ricerca affannosamente, e oggi si conoscono 400 pulsar. È possibile che ve ne siano, nella nostra galassia, anche 100 mila, alcune delle quali potrebbero distare solo 100 anni luce. (Non c'è ragione di pensare che non ne esistano nelle altre galassie; ma a quelle distanze sono probabilmente troppo deboli per essere rivelate.)

Tutte le pulsar sono caratterizzate da un'estrema regolarità di pulsazione, ma il valore del periodo varia dall'una all'altra. Una ha un periodo che raggiunge i 3,7 secondi. Nel novembre del 1968 gli astronomi di Green Bank, nella Virginia occidentale, scoprirono nella nebulosa granchio una pulsar che aveva un periodo di soli 0,033089 secondi, e pulsava pertanto 30 volte al secondo.

Naturalmente il problema era: che cosa può produrre questi brevi lampi, con una regolarità così fantastica? Deve esserci un qualche corpo astronomico che subisce un mutamento estremamente regolare a intervalli tanto rapidi da produrre gli impulsi. Potrebbe forse trattarsi di un pianeta, che gira intorno a una stella e che, visto dalla terra, a ogni rivoluzione viene occultato, per poi riapparire emettendo un potente impulso di radioonde? Oppure di un pianeta che ruota su se stesso in modo tale che una particolare zona della sua superficie, che emetta grandi quantità di radioonde, punti a ogni giro in direzione della terra?

In entrambi i casi, però, occorrerebbe che il moto del pianeta (intorno a una stella o sul proprio asse) avesse un periodo di pochi secondi o addirittura di frazioni di secondo, cosa impensabile. Per produrre degli impulsi della rapidità di quelli delle pulsar, un oggetto dovrebbe avere un moto di rotazione o di rivoluzione con velocità enorme, e ciò richiederebbero dimensioni minime combinate con temperature elevatissime, oppure con campi gravitazionali molto intensi, o con entrambe le cose.

Ciò fece pensare immediatamente alle nane bianche, ma neppure esse possono ruotare l'una intorno all'altra o sul proprio asse, o pulsare, con un periodo abbastanza breve da rendere ragione del comportamento delle pulsar. Le nane bianche sono ancora troppo grandi e il loro campo gravitazionale troppo debole.

Thomas Gold suggerì subito che responsabili del fenomeno fossero le stelle di neutroni, facendo osservare che esse sono abbastanza piccole e dense per poter ruotare intorno al proprio asse in tempi inferiori a 4 secondi. Inoltre, era già stata avanzata in sede teorica l'idea che una stella di neutroni dovesse avere un campo magnetico intensissimo, i cui poli potrebbero anche non coincidere con quelli di rotazione.

Gli elettroni sarebbero allora trattenuti dalla gravità della stella di neutroni con tale forza da poter sfuggire solo dai poli magnetici; una volta espulsi verso l'esterno, essi perderebbero energia, sotto forma di onde radio. Ci sarebbe quindi un fascio continuo di onde radio emesse da due punti diametralmente opposti della superficie della stella di neutroni.

Se, al ruotare della stella di neutroni, uno di questi fasci di onde radio, o entrambi, venissero diretti verso la terra, noi riceveremmo un breve impulso di onde radio, una o due volte per rivoluzione. Se così fosse, noi potremmo scoprire solo quelle pulsar che, per caso, ruotano in modo da puntare almeno uno dei loro poli magnetici nella nostra direzione. Alcuni astronomi stimano che solo una stella di neutroni su 100 potrebbe soddisfare tale condizione; se esistono veramente 100 mila stelle di neutroni nella galassia, solo 1000 potrebbero essere individuate dalla terra.

Gold proseguiva osservando che, se la sua teoria era corretta, la stella di neutroni avrebbe dovuto perdere energia dai poli magnetici, e la sua velocità di rotazione sarebbe diminuita. Così, più il periodo di una pulsar è breve, più essa è giovane e più rapidamente è destinata a perdere energia e quindi velocità.

La pulsar più rapida conosciuta a quel tempo era quella della nebulosa granchio. Avrebbe benissimo potuto essere anche la più giovane, perché l'esplosione della supernova di cui la stella di neutroni sarebbe un residuo è avvenuta meno di mille anni orsono.

Il periodo della pulsar della nebulosa granchio è stato studiato molto accuratamente, e si è trovato che la pulsar rallenta effettivamente, come Gold aveva previsto. Il periodo va aumentando di 36,48 miliardesimi di secondo al giorno. Lo stesso fenomeno fu scoperto anche in altre pulsar; all'inizio degli anni settanta l'ipotesi dell'esistenza delle stelle di neutroni era ormai ampiamente accettata.

Qualche volta una pulsar presenta un'improvvisa anche se modesta diminuzione del proprio periodo, per poi riprendere la tendenza a rallentare. Alcuni astronomi sospettano che questo fatto sia dovuto a un «terremoto stellare», cioè a un cambiamento della distribuzione della massa all'interno della stella di neutroni. O forse la causa potrebbe essere l'impatto con un corpo di una certa grandezza, che andrebbe ad aumentare il momento angolare della stella. Non v'era comunque ragione per cui gli elettroni emergenti da una stella di neutroni dovessero perdere la loro energia

soltanto sotto forma di microonde; avrebbero potuto benissimo produrre onde di tutto lo spettro, regione visibile compresa.

Si concentrò allora l'attenzione sulle porzioni della nebulosa granchio in cui potevano esservi dei residui visibili dell'antica esplosione. E infatti nel gennaio del 1969 si notò che la luce di una debole stella nella nebulosa si accendeva e si spegneva in perfetta sincronia con gli impulsi di microonde. La scoperta si sarebbe potuta verificare prima, se gli astronomi avessero avuto la benché minima idea di dover andare alla ricerca di questo rapido alternarsi di luce e buio. La pulsar della nebulosa granchio fu la prima pulsar ottica scoperta - la prima stella di neutroni visibile.

La pulsar della nebulosa granchio emetteva anche raggi X. Circa il 5 per cento di tutti i raggi X provenienti dalla nebulosa granchio veniva dalla minuscola stella che si accendeva e spegneva. In tal modo tornava trionfalmente alla ribalta il nesso tra raggi X e stelle di neutroni, che nel 1964 sembrava esser stato smentito.

Poteva sembrare che non dovessero più venire sorprese dalle stelle di neutroni; invece nel 1982 gli astronomi del radiotelescopio da 300 metri di Arecibo (Portorico) individuarono una pulsar che pulsava 642 volte al secondo, cioè venti volte più rapidamente della pulsar della nebulosa granchio. Si tratta probabilmente di una pulsar più piccola della maggior parte delle altre - con un diametro di non più di 5 chilometri; la sua massa potrebbe essere due o tre volte quella del sole, e quindi il suo campo gravitazionale deve raggiungere un'intensità enorme. Ma, nonostante ciò, una rotazione così rapida dovrebbe quasi mandarla in pezzi. Un altro enigma è che la sua velocità di rotazione sta rallentando troppo poco, rispetto a quanto sarebbe da aspettarsi in considerazione delle enormi quantità di energia dissipate dalla stella.

È stata scoperta una seconda "pulsar veloce", e gli astronomi sono molto impegnati a fare congetture sulle ragioni di simili fenomeni.

I BUCHI NERI.

Ma neppure le stelle di neutroni costituiscono l'ultima frontiera.

Oppenheimer, studiando nel 1939 le proprietà delle stelle di neutroni, aveva previsto anche la possibilità che una stella di massa sufficientemente grande (più di 3,2 volte la massa del sole) si contraesse fino a ridursi a un punto, o singolarità.

Quando il collasso di una stella procede oltre lo stadio della stella di neutroni, il suo campo gravitazionale acquista una tale intensità che la materia non può più assolutamente uscirne, e neppure la luce riesce a sfuggirne. Dato che qualsiasi cosa catturata da tale campo gravitazionale inconcepibilmente intenso vi cadrebbe dentro senza possibilità di ritorno, lo si può concepire come un «buco» infinitamente profondo nello spazio; e poiché neppure la luce può sfuggirne, è stato chiamato "buco nero" - espressione coniata dal fisico americano John Archibald Wheeler negli anni sessanta.

Solo una stella su mille circa ha abbastanza massa da avere qualche probabilità di diventare un buco nero in seguito a collasso; di tali stelle, inoltre, molte possono perdere parte della propria massa esplodendo come supernovae, e in tal modo possono evitare il destino di buco nero. Ma anche così potrebbero esistere decine di milioni di tali stelle in questo momento; nel corso poi dell'intera vita della galassia, possono essercene state a miliardi. Anche se soltanto una su mille di queste stelle dotate di grande massa dà effettivamente origine, in seguito a collasso, a un buco nero, ce ne dovrebbero essere ugualmente circa un milione sparsi nella galassia. Ma allora, dove sono?

Il guaio è che i buchi neri sono difficilissimi da scoprire. Non è possibile avvistarli nel solito modo, dato che non possono emettere luce né alcun'altra forma di radiazione. E anche se il loro campo gravitazionale è fortissimo nelle immediate vicinanze, alle distanze stellari la sua intensità non è superiore a quella dei campi delle altre stelle.

In alcuni casi, però, un buco nero può trovarsi in condizioni particolari, che consentono di individuarlo. Si supponga che un buco nero faccia parte di un sistema stellare binario; che esso giri,

insieme alla sua compagna, intorno al comune centro di gravità, e che la compagna sia una stella normale.

Se le due stelle sono abbastanza vicine, può darsi che un po' di materia della stella ordinaria sia attratta poco alla volta verso il buco nero, e si metta in orbita intorno a esso, formando quello che viene chiamato un "disco di accrescimento". La materia di questo disco comincerà a muoversi lentamente lungo una spirale che va a finire nel buco nero: e durante questa discesa emetterà, per un processo ben noto, raggi X.

Si deve, dunque, cercare una sorgente di raggi X in una zona del cielo in cui non è visibile alcuna stella: una sorgente che sembri orbitare intorno a un'altra stella che sia invece visibile.

Nel 1965 venne scoperta una sorgente particolarmente intensa di raggi X nella costellazione del Cigno, e le venne dato il nome di Cygnus X- 1. Si pensa che si trovi a circa 10 mila anni luce da noi. Essa non era che un'ulteriore sorgente di raggi X, fino al giorno in cui, nel 1970, venne lanciato dalla costa del Kenya un satellite per il rilevamento dei raggi X, che, dallo spazio, scoprì 161 nuove sorgenti di tale tipo. Nel 1971 il satellite rilevò cambiamenti irregolari nell'intensità dei raggi X provenienti da Cygnus X-1, proprio come sarebbe da aspettarsi nel caso di un buco nero nel quale precipitassero getti di materia staccatisi dal disco di accrescimento.

Immediatamente ci si mise a studiare attentamente Cygnus X-1. Si accertò che si trovava nelle immediate vicinanze di una grande stella azzurra molto calda, la cui massa era circa 30 volte quella del sole.

L'astronomo C. T. Bolt dell'Università di Toronto mostrò che questa stella e Cygnus X-1 giravano l'una intorno all'altra. Dalla natura dell'orbita si poteva dedurre che Cygnus X-1 doveva avere da 5 a 8 volte la massa del sole. Se Cygnus X-1 fosse stata una stella normale sarebbe stata visibile; dal momento che non era visibile, doveva essere un oggetto molto piccolo. Ma aveva una massa troppo grande per essere una nana bianca o anche una stella di neutroni, e allora doveva essere per forza un buco nero. Gli astronomi non sono ancora del tutto sicuri di questa conclusione, ma molti di loro si ritengono soddisfatti delle prove addotte e considerano Cygnus X-1 il primo buco nero che sia stato scoperto.

Sembrerebbe che la probabilità di formazione di un buco nero sia massima là dove le stelle sono più fitte e dove quindi è più probabile che si accumulino in uno stesso posto enormi masse di materia. Dal momento che un'alta intensità di radiazione è associata alle regioni centrali di certi agglomerati di stelle come gli ammassi globulari e i nuclei galattici, gli astronomi sono sempre più propensi a credere che al centro di ammassi e galassie vi siano dei buchi neri.

E in effetti una sorgente compatta ed energetica di microonde è stata scoperta anche al centro della nostra galassia. Potrebbe corrispondere a un buco nero? Alcuni astronomi ne sono convinti, e ritengono che tale buco nero abbia la massa di 100 milioni di stelle, ossia un millesimo della massa di tutta la galassia. Esso avrebbe un diametro pari a 500 volte quello del nostro sole (ossia pari a quello di una grande gigante rossa) e sarebbe abbastanza grande per frantumare intere stelle con i suoi effetti di marea, o per inghiottirle tutte intere prima ancora che vadano in pezzi, se l'avvicinamento avvenisse con sufficiente rapidità.

Oggi, in realtà, si pensa che sia possibile che la materia sfugga da un buco nero, anche se non nel modo normale. Il fisico inglese Stephen Hawking, nel 1970, mostrò che l'energia contenuta in un buco nero può occasionalmente dar luogo alla creazione di una coppia di particelle subatomiche, una delle quali potrebbe riuscire a sfuggire. Ciò significa, in pratica, che un buco nero potrebbe evaporare. Buchi neri della grandezza di una stella evaporerebbero, secondo questa ipotesi, così lentamente che dovrebbero passare eoni inconcepibili di tempo (trilioni di trilioni di volte l'età attuale dell'universo) prima della loro evaporazione totale.

Tuttavia, la velocità di evaporazione crescerebbe al diminuire della massa. Un mini-buco nero, con una massa non superiore a quella di un pianeta o di un asteroide (e siffatti minuscoli oggetti potrebbero esistere, purché avessero una densità sufficiente, cioè fossero compressi in un volume abbastanza piccolo), potrebbe evaporare con rapidità tale da emettere quantità apprezzabili

di raggi X. Inoltre la velocità di evaporazione e la produzione di raggi X aumenterebbero costantemente al diminuire della sua massa per effetto dell'evaporazione. Infine, quando il minibuco nero fosse sufficientemente piccolo, esploderebbe emettendo un impulso di raggi gamma di tipo caratteristico.

Ma quale potrebbe essere la causa della compressione di piccole quantità di materia fino alle terrificanti densità richieste perché si formi un mini-buco nero? Le stelle di grande massa possono essere compresse dal loro stesso campo gravitazionale, ma la cosa è impossibile nel caso di oggetti della grandezza di un pianeta, i quali inoltre per formare un buco nero dovrebbero avere una densità maggiore di quella necessaria nel caso di stelle di grande massa.

Nel 1971 Hawking suggerì che i mini-buchi neri si siano formati all'epoca del big bang, quando le condizioni erano molto più estreme che in qualsiasi altra epoca. Alcuni di questi mini-buchi neri potrebbero aver avuto dimensioni tali che solo ora, dopo 15 miliardi di anni di esistenza, sarebbero evaporati fino al punto di esplodere; e gli astronomi potrebbero dimostrarne l'esistenza rivelando i relativi impulsi di raggi gamma.

È una teoria affascinante, ma finora non sorretta da alcuna prova.

LO SPAZIO «VUOTO».

Se vi sono oggetti nell'universo che ci sorprendono, anche i vasti spazi cosiddetti vuoti tra le stelle ci riservano delle sorprese. La non-vuotezza dello spazio «vuoto» si è dimostrata una fonte di problemi per gli astronomi in occasione di osservazioni a distanze relativamente modeste.

In un certo senso, la galassia più difficile da vedere per noi è proprio la nostra. Per prima cosa, siamo imprigionati al suo interno, mentre delle altre galassie possiamo farci un'idea globale dall'esterno: è la stessa differenza che corre tra osservare una città dal tetto di un edificio basso e osservarla da un aereo. In secondo luogo, siamo situati ben lontano dal centro, e, per peggiorare le cose, ci troviamo in un braccio pieno di polvere della spirale. In altre parole, è come se fossimo su un tetto non molto alto alla periferia della città, in una giornata nebbiosa.

Lo spazio interstellare non è, parlando in generale, un vuoto perfetto in condizioni ideali: vi è un gas rarefatto disperso ovunque nello spazio interstellare entro le galassie. Le righe spettrali di assorbimento dovute alla presenza di questo "gas interstellare" furono osservate per la prima volta nel 1904 dall'astronomo tedesco Johannes Franz Hartmann. Alla periferia della galassia la concentrazione di gas e polvere aumenta. Nelle galassie più vicine possiamo scorgere questo velo scuro di polvere che le circonda.

Possiamo effettivamente «vedere» le nubi di polvere, come in una negativa, nella nostra stessa galassia, sotto forma di zone buie della Via Lattea. Ne sono esempi la nebulosa oscura «testa di cavallo», che si staglia nettamente sullo sfondo dei milioni di stelle che le brillano intorno, e quella ancor più suggestivamente denominata «sacco di carbone», che si trova nella Croce del Sud: una regione ricca di particelle di polvere, che ha il diametro di 30 anni luce e dista da noi circa 400 anni luce.

Le nubi di polvere e gas nascondono alla visione diretta i bracci a spirale della galassia, ma non impediscono allo spettroscopio di analizzarne la struttura. Gli atomi di idrogeno delle nubi sono ionizzati (cioè scissi in particelle subatomiche elettricamente cariche) per effetto della radiazione ad alta energia proveniente dalle stelle di popolazione prima nei bracci. A partire dal 1951, l'astronomo americano William Wilson Morgan identificò delle strisce di idrogeno ionizzato, che delineavano le sagome dei bracci a spirale popolati dalle giganti azzurre. I loro spettri erano simili a quelli dei bracci a spirale della galassia di Andromeda.

Il più vicino di tali filamenti di idrogeno ionizzato include le giganti azzurre della costellazione di Orione, ed è perciò chiamato braccio di Orione. Il nostro sistema solare si trova in questo braccio. Allo stesso modo sono stati individuati altri due bracci. Uno si trova molto più

lontano di noi dal centro della galassia, e include le stelle giganti della costellazione di Perseo (braccio di Perseo).

L'altro è più vicino al centro galattico e contiene le nubi luminose della costellazione del Sagittario (braccio del Sagittario). Si stima che ciascun braccio abbia una lunghezza di circa 10 mila anni luce.

Poi giunse il valido apporto della radioastronomia; non solo essa poteva penetrare al di là delle nubi che impedivano la vista, ma riusciva a farsi raccontare dalle nubi stesse la loro storia. Tutto ciò fu conseguenza del lavoro dell'astronomo olandese Hendrik Christoffel van de Hulst. Nel 1944 l'Olanda era sotto il giogo dell'occupazione nazista e l'osservazione astronomica era praticamente impossibile. Van de Hulst, limitandosi a lavorare con carta e penna, studiò le caratteristiche degli ordinari atomi di idrogeno, di cui è prevalentemente composto il gas interstellare.

Egli avanzò l'ipotesi che di tanto in tanto questi atomi possano mutare, in seguito a collisioni, il loro stato energetico, emettendo al contempo una debole radiazione nella regione spettrale delle onde radio. A un singolo atomo d'idrogeno questo potrebbe capitare non più di una volta in 11 milioni di anni; ma, tenendo conto dell'enorme numero di atomi presenti nello spazio intergalattico, ci sarebbe in ogni momento un numero di emissioni sufficiente a produrre un segnale rivelabile con continuità.

Van de Hulst calcolò che la lunghezza d'onda della radiazione doveva essere di 21 centimetri. Infatti, con lo sviluppo postbellico delle nuove tecniche radioastronomiche, questo «canto dell'idrogeno» fu captato, nel 1951, da Edward Mills Purcell e Harold Irving Ewen della Harvard University.

Sintonizzandosi sulla radiazione di 21 centimetri prodotta dalle nubi di idrogeno, gli astronomi riuscirono a tracciare una mappa dei bracci a spirale seguendoli per lunghi tratti - nella maggior parte dei casi praticamente tutto attorno alla galassia. Furono trovati altri bracci; le mappe della concentrazione dell'idrogeno mostrano una mezza dozzina o più di tali filamenti.

Inoltre il canto dell'idrogeno dava informazioni sui suoi movimenti.

Come tutte le onde, questa radiazione è soggetta all'effetto Doppler-Fizeau, che permette agli astronomi di misurare la velocità con cui si muovono le nubi di idrogeno e di indagare, tra l'altro, sulla rotazione della nostra galassia. Questa nuova tecnica ha confermato che la galassia ruota con un periodo di 200 milioni di anni (alla nostra distanza dal centro).

Nella scienza, ogni nuova scoperta apre delle porte che introducono a nuovi misteri. I progressi più grandi vengono da quanto era inaspettato, dalle scoperte che ribaltano quanto si sapeva in precedenza. Un interessante esempio d'attualità al proposito è un fenomeno sconcertante messo in evidenza dagli studi radioastronomici sulla concentrazione di idrogeno al centro della nostra galassia.

Sembra che l'idrogeno si stia espandendo, però restando confinato nel piano equatoriale della galassia. L'espansione già è sorprendente, perché non c'è nessuna teoria che la spieghi; inoltre, se l'idrogeno si va espandendo, come mai non si è dissipato tutto durante la lunga vita della nostra galassia? È forse un indizio che, circa 10 milioni di anni fa, come sospetta Oort, il suo centro è esploso, come ha fatto molto più recentemente quello di M 82? Inoltre, il piano in cui si trova l'idrogeno non è del tutto piatto, ma è ricurvo verso il basso da una parte e verso l'alto dall'altra. Perché? Non è stata ancora proposta alcuna spiegazione soddisfacente.

L'idrogeno non è, o non dovrebbe essere, unico per quanto riguarda le onde radio. Ogni altro atomo, o combinazione di atomi, è capace di emettere (o di assorbire dal fondo) un'onda radio caratteristica. È naturale, allora, che gli astronomi si siano messi alla ricerca delle rivelatrici «impronte digitali» di altri atomi, diversi dal comunissimo idrogeno.

Quasi tutto l'idrogeno che si trova in natura appartiene a una varietà particolarmente semplice, quella chiamata "idrogeno-1". Vi è poi una forma più complessa, il "deuterio", o

"idrogeno-2". Sono state passate al vaglio le onde radio provenienti da varie parti del cielo, alla ricerca della lunghezza d'onda prevista dalla teoria per tale atomo.

Nel 1966 essa fu scoperta, e le osservazioni indicano che la quantità di idrogeno-2 presente nell'universo è circa il 5 per cento di quella dell'idrogeno-1.

Gli elementi più comuni nell'universo, dopo l'idrogeno nelle sue varie forme, sono l'elio e l'ossigeno. Un atomo di ossigeno può combinarsi con uno di idrogeno formando un "ossidrile". Questa combinazione non sarebbe stabile sulla terra, perché il gruppo ossidrilico è molto attivo e si combinerebbe praticamente con qualsiasi altro atomo o molecola che incontrasse. In particolare si combinerebbe con un secondo atomo di idrogeno, formando una molecola di acqua. Nello spazio interstellare, invece, dove gli atomi sono così rarefatti che le collisioni sono poche e molto distanziate, un gruppo ossidrilico, una volta formatosi, persisterebbe indisturbato per lunghi periodi di tempo, come sottolineò nel 1953 l'astronomo sovietico I. S. Shklovskij.

I calcoli mostrarono che questo gruppo ossidrilico emette o assorbe onde radio di quattro particolari lunghezze d'onda. Nell'ottobre del 1963, due di esse furono scoperte da un'équipe di radioingegneri del Lincoln Laboratory del MIT.

Dato che il gruppo ossidrilico ha una massa che è circa 17 volte quella dell'atomo di idrogeno, esso è più lento e si sposta con una velocità che è solo un quarto di quella dell'atomo di idrogeno a una data temperatura. In genere il movimento rende indistinte le lunghezze d'onda, quindi il segnale dell'ossidrile risulta più nitido di quello dell'idrogeno. I suoi spostamenti spettrali sono più facili da determinarsi, ed è anche più facile dire se una nube di gas che contenga ossidrile si stia avvicinando o allontanando.

Gli astronomi furono soddisfatti, ma non troppo sorpresi, quando trovarono la prova dell'esistenza di una combinazione di due atomi nelle vaste distese di spazio tra una stella e l'altra. Immediatamente si misero alla ricerca di altre combinazioni, senza però troppe speranze. Gli atomi sono talmente rarefatti nello spazio interstellare che sembrava molto remota la possibilità che più di due atomi venissero a contatto per un tempo abbastanza lungo da potersi combinare. Sembrava anche esclusa la possibilità che restassero coinvolti in tali processi atomi meno comuni dell'ossigeno (per esempio atomi di carbonio e di azoto, che sono, dopo l'ossigeno, gli elementi più comuni tra quelli suscettibili di combinarsi).

Ma poi, a partire dal 1968, vennero le grandi sorprese. Nel novembre di quell'anno gli astronomi scoprirono «impronte digitali» - costituite da radioonde - di molecole di acqua (H_20). Queste molecole sono formate da 2 atomi di idrogeno e 1 di ossigeno - 3 atomi in tutto. Nello stesso mese, fatto ancora più sorprendente, vennero scoperte molecole di ammoniaca (NH_3), cioè composte dalla combinazione di quattro atomi: tre di idrogeno e uno di azoto.

Nel 1969 fu identificata un'altra combinazione di quattro atomi, tra cui uno di carbonio: si trattava della formaldeide (H_2CO).

Nel 1970 vennero fatte parecchie altre scoperte, tra cui quella di una molecola di 5 atomi, il cianoacetilene, che conteneva una catena di 3 atomi di carbonio (HCCCN), e quella dell'alcool metilico, con una molecola di 6 atomi (CH_30H).

Nel 1971 fu scoperta una combinazione di 7 atomi, il metilacetilene (CH_3CCH); e nel 1982 fu scoperta anche una combinazione di 13 atomi, il cianodecapentino, formato da una catena di 11 atomi di carbonio uno in fila all'altro, con un atomo d'idrogeno a un estremo e uno di azoto all'altro ($HC_{11}N$).

Gli astronomi si ritrovarono quindi fra le mani una branca totalmente nuova e inaspettata della scienza: l'"astrochimica".

Gli astronomi ignorano come questi atomi si uniscano a formare molecole complicate e come tali molecole riescano a sopravvivere nonostante il diluvio di intensa radiazione proveniente dalle stelle, che normalmente dovrebbe farle a pezzi. Presumibilmente queste molecole si formano in condizioni che non sono quelle di vuoto assoluto che si riteneva caratterizzassero lo spazio

interstellare - forse in regioni in cui le nubi di polvere si vanno addensando per dar luogo alla formazione di stelle.

Se è così, scopriremo forse molecole ancora più complicate, la cui presenza potrebbe rivoluzionare le nostre idee sullo sviluppo della vita sui pianeti, come vedremo nei prossimi capitoli.

Capitolo 3.
IL SISTEMA SOLARE.

NASCITA DEL SISTEMA SOLARE.

Per stupende e immense che siano le profondità inimmaginabili dell'universo, non possiamo perderci per sempre in tanta magnificenza; dobbiamo far ritorno a quella piccola famiglia di mondi nella quale viviamo. Dobbiamo far ritorno al nostro sole - niente più che una delle centinaia di miliardi di stelle che costituiscono la nostra galassia - e ai mondi che gli girano intorno, uno dei quali è la terra.

Dall'epoca di Newton in poi è diventato possibile analizzare razionalmente il problema della creazione della terra e del sistema solare, considerandolo come distinto dal problema della creazione della totalità dell'universo. L'immagine del sistema solare mostra infatti che esso è una struttura contraddistinta da alcune caratteristiche unificatrici:

1) Tutti i pianeti principali girano intorno al sole approssimativamente nel suo piano equatoriale. In altre parole, un modellino tridimensionale del sole con i pianeti risulterebbe molto appiattito;

2) Tutti i pianeti principali girano intorno al sole nello stesso senso (precisamente in senso antiorario se si immagina di guardare verso il basso dalla Stella Polare);

3) I pianeti principali (con qualche eccezione) ruotano intorno al proprio asse, anch'essi in senso antiorario, e altrettanto fa il sole;

4) I pianeti sono situati in orbite approssimativamente circolari, la cui distanza dal sole aumenta regolarmente;

5) I satelliti (con qualche eccezione di poco conto) girano intorno al rispettivo pianeta in orbite approssimativamente circolari, nel piano equatoriale del pianeta e in senso antiorario.

Un quadro tanto regolare invitava naturalmente a pensare che un unico processo avesse dato origine all'intero sistema.

Qual è dunque questo processo che ha prodotto il sistema solare? Tutte le teorie proposte fino a oggi rientrano in due categorie: quella delle teorie catastrofiste e quella delle teorie evoluzioniste.

Secondo il punto di vista catastrofista il sole all'inizio fu creato in beata solitudine, e poi si sarebbe fatta una famiglia, in una fase relativamente tarda della sua storia, attraverso un evento violento.

La concezione evoluzionista, invece, sostiene che fin dal primo momento l'intero sistema - sole e pianeti - ha avuto origine in modo ordinato.

Nel diciottesimo secolo gli scienziati subivano ancora il fascino delle narrazioni bibliche di eventi grandiosi, come il Diluvio; era quindi consono alla mentalità dell'epoca concepire una storia della terra irta di violente catastrofi. Perché allora non pensare a una supercatastrofe, che avesse dato inizio al tutto? Una teoria assai in voga era quella avanzata nel 1745 dal naturalista francese Louis Leclerc de Buffon, secondo cui il sistema solare si sarebbe formato dai frammenti prodotti da una collisione tra il sole e una cometa. Buffon, naturalmente, intendeva una collisione tra il sole e

un altro corpo di massa comparabile, che aveva chiamato «cometa» in mancanza di un altro termine. Oggi noi sappiamo che le comete sono corpi piccolissimi circondati da una scia evanescente di polvere e gas; ma l'idea di Buffon era destinata a sopravvivere, sia pure mutando il nome del corpo con cui sarebbe avvenuta la collisione; e, infatti, in epoche successive gli astronomi ripresero la concezione di Buffon.

Ad alcuni appariva tuttavia più naturale e meno casuale che all'origine del sistema solare vi fosse stato un processo non catastrofico, di lunga durata; cosa che, inoltre, si confaceva meglio al grandioso quadro, tracciato da Newton, di una legge naturale che governasse il moto di tutti i mondi dell'universo.

Lo stesso Newton aveva proposto che il sistema solare avesse avuto origine da una tenue nube di polvere e gas, condensatasi lentamente per effetto dell'attrazione gravitazionale. L'addensamento delle particelle avrebbe fatto aumentare l'intensità del campo gravitazionale, il che a sua volta avrebbe accelerato la condensazione; infine, l'intera massa, in seguito a collasso, avrebbe dato origine a un corpo denso (il sole), reso incandescente dall'energia della contrazione.

Questa è essenzialmente la base delle teorie più diffuse sull'origine del sistema solare. Restavano però da risolvere molti spinosi problemi per rispondere a quesiti specifici. Per esempio, come ha potuto una forza di gravità estremamente debole causare la concentrazione di un gas altamente rarefatto? Recentemente, gli astronomi hanno proposto che il processo sia stato innescato dall'esplosione di una supernova.

Supponiamo che un'immensa nube di polvere e gas, rimasta relativamente immutata per miliardi di anni, finisca casualmente nelle vicinanze di una stella appena esplosa in una supernova. L'onda d'urto generata da tale esplosione, l'immane raffica di polvere e gas che si aprirebbe un varco entro la nube fino ad allora quasi in quiete, la comprimerebbe, aumentando l'intensità del campo gravitazionale e innescando il processo di condensazione destinato poi a produrre la formazione di una stella.

Supponendo che questa sia stata l'origine del sole, come si sono formati i pianeti? Qual è la loro origine? I primi tentativi di rispondere a questo quesito furono compiuti da Immanuel Kant nel 1755 e, indipendentemente, dall'astronomo e matematico francese Pierre Simon de Laplace nel 1796; quest'ultimo fornì una spiegazione più dettagliata.

Secondo la descrizione di Laplace, l'immensa nube di materia in via di contrazione aveva fin dall'inizio un moto rotatorio. Più essa si contraeva, maggiore diventava la sua velocità di rotazione, come accade, per esempio, a un pattinatore, che gira su se stesso più rapidamente se tiene le braccia aderenti al corpo. (Si tratta di un effetto dovuto alla conservazione del momento angolare; il momento angolare è proporzionale al prodotto della velocità per la distanza dal centro di rotazione; pertanto, se tale distanza diminuisce, la velocità aumenta in ragione inversa.) Secondo Laplace, con il progressivo aumento della velocità di rotazione della nube, questa cominciò a espellere un anello di materia dal proprio equatore in rapido moto, cedendo così parte del momento angolare. Di conseguenza la nube rallentò il proprio moto. Tuttavia, con il protrarsi del processo di contrazione, venne nuovamente raggiunta una velocità tale da causare l'espulsione di un altro anello di materia. Fu così che il sole, nel condensarsi, si lasciò dietro una serie di anelli - nubi di materia a forma di ciambella. Sempre secondo Laplace, questi anelli si sarebbero poi lentamente condensati, dando origine ai pianeti; a loro volta questi avrebbero espulso e lanciato nello spazio altri anelli, più piccoli, destinati a formare i loro satelliti.

Dato che, secondo questa concezione, il sistema solare avrebbe avuto origine da una nube, o nebulosa, e dato che Laplace portava come esempio la nebulosa di Andromeda (allora non si sapeva ancora che essa è una grande galassia e si credeva che fosse una nube di polvere e gas in rotazione), la proposta di Laplace prese il nome di "ipotesi della nebulosa".

Questa ipotesi appariva in grado di spiegare in modo soddisfacente non solo le caratteristiche generali del sistema solare, ma anche alcune sue particolarità. Per esempio, gli anelli di Saturno potrebbero essere anelli-satelliti che non sono riusciti a condensarsi. (In effetti, messi

tutti insieme formerebbero un satellite di dimensioni ragguardevoli.) Analogamente i piccoli pianeti, che girano intorno al sole all'interno di una fascia compresa tra Marte e Giove, potrebbero esser stati prodotti da spezzoni di un anello che non è riuscito a diventare un pianeta. Quando in seguito Helmholtz e Kelvin elaborarono delle teorie che attribuivano l'energia del sole alla sua lenta contrazione, anche questo sembrò inserirsi bene nel quadro esplicativo di Laplace.

L'ipotesi della nebulosa tenne il campo per buona parte del diciannovesimo secolo, ma ben prima che questo volgesse al termine cominciarono a venire alla luce i punti deboli della teoria. Nel 1859 James Clerk Maxwell, analizzando matematicamente gli anelli di Saturno, dimostrò che un anello di materiale gassoso espulso da un corpo qualsiasi non può che condensarsi in un gran numero di piccole particelle, proprio come accade negli anelli di Saturno; non potrebbe mai formare un corpo compatto, a causa delle forze gravitazionali che lo frantumerebbero prima che possa verificarsi la condensazione.

Sorse poi il problema del momento angolare. Risultò che i pianeti, che costituiscono solo poco più dello 0,1 per cento della massa di tutto il sistema solare, possiedono il 98 per cento del suo momento angolare totale! Giove da solo possiede il 60 per cento del momento angolare totale del sistema solare. Il sole, pertanto, ha conservato solo una minima parte del momento angolare della nube originaria. Come mai quasi tutto il momento angolare è stato trasferito all'esiguo anello di materia distaccatosi dalla nebulosa? Il problema diventa ancora più imbarazzante se si tiene conto che, nel caso di Giove e Saturno - i quali hanno dei sistemi di satelliti che appaiono sistemi solari in miniatura, e che presumibilmente hanno avuto un'analoga origine -, il corpo centrale conserva la maggior parte del momento angolare.

Attorno al 1900 l'ipotesi della nebulosa era talmente in crisi da far apparire screditata qualsiasi concezione che si rifacesse a un processo evolutivo. Tutto era pronto per un rientro sulle scene del catastrofismo. Nel 1905 due scienziati americani, Thomas Chrowder Chamberlin e Forest Ray Moulton, facendo uso di un termine più adeguato di quello di cometa, spiegarono i pianeti come prodotto di una quasi-collisione tra il sole e un'altra stella. L'incontro ravvicinato avrebbe fatto uscire da entrambi i soli una certa quantità di materiale gassoso; le nubi di materiale rimaste in vicinanza del nostro sole si sarebbero condensate in seguito in piccoli "oggetti planetesimali", e questi a loro volta in pianeti. È questa l'"ipotesi planetesimale". Quanto al problema del momento angolare, gli scienziati britannici James Hopwood Jeans e Harold Jeffreys, nel 1918, avanzarono un'"ipotesi delle maree", suggerendo che l'attrazione gravitazionale esercitata dalla stella di passaggio avesse dato alle masse di gas espulse una sorta di «strattone» laterale, imprimendo loro un momento angolare. Se questa versione del catastrofismo fosse vera, i sistemi planetari dovrebbero essere rarissimi: infatti le stelle sono a una tale distanza reciproca, che le collisioni stellari sono diecimila volte più rare delle supernovae, che a loro volta rappresentano un fenomeno non comune. Si ritiene che, nel corso della vita della galassia, ci sarebbe stato tempo solo per dieci «incontri» da cui - secondo questa teoria - avrebbe potuto formarsi un sistema solare.

Questi primi tentativi di ipotizzare modelli di catastrofe non hanno però retto alla verifica dell'analisi matematica. Russell ha dimostrato che in qualunque quasi-collisione di questo genere i pianeti sarebbero dovuti finire migliaia di volte più lontani dal sole di quanto non siano in realtà. Anche alcuni tentativi di rabberciare la teoria immaginando vari tipi di collisioni vere e proprie piuttosto che passaggi a distanza ravvicinata, non hanno avuto molto successo.

Durante gli anni trenta Lyttleton speculò intorno alla possibilità di una collisione tra tre stelle, e più tardi Hoyle suggerì l'idea che il sole abbia avuto una compagna che è finita come supernova, lasciando i pianeti in eredità. Nel 1939, tuttavia, l'astronomo americano Lyman Spitzer dimostrò che qualsiasi materiale espulso dal sole in qualsiasi circostanza sarebbe talmente caldo che non si condenserebbe in planetesimali, ma si limiterebbe ad espandersi sotto forma di gas estremamente rarefatto. Con ciò, sembrava che ogni ipotesi di catastrofe fosse da abbandonare definitivamente (il che non ha impedito a un astronomo britannico, M. M. Woolfson, di suggerire

nel 1965 che il sole possa aver tratto il suo materiale planetario da una stella fredda molto diffusa; si eviterebbe in tal modo lo scoglio delle altissime temperature).

Così, dopo che la teoria planetesimale era giunta a un punto morto, gli astronomi ritornarono alla concezione evolutiva, provando a riesumare l'ipotesi di Laplace.

Nel frattempo, la loro conoscenza dell'universo si era immensamente ampliata. Ora dovevano spiegare la formazione delle galassie, che richiedeva nubi di polvere e gas molto più grandi di quella immaginata da Laplace come progenitrice del sistema solare. E ormai era chiaro che, in ammassi così vasti di materia, si sarebbero manifestate delle turbolenze che avrebbero dato origine a vortici, ciascuno dei quali avrebbe potuto condensarsi formando un sistema a sé.

Nel 1944 l'astronomo tedesco Carl F. von Weizsacker analizzò a fondo questa idea e calcolò che i vortici più grandi potevano contenere abbastanza materia da formare delle galassie. La contrazione turbolenta di uno di questi vortici avrebbe dato origine a sottovortici, ciascuno dei quali sarebbe stato abbastanza grande da originare un sistema solare (con uno o più soli). Alla periferia del vortice solare, da sottovortici ancora più piccoli si sarebbero potuti formare i pianeti. Infatti, nei punti di contatto di questi ultimi sottovortici, in moto con versi opposti come ruote di un ingranaggio, ci sarebbero stati scontri di particelle di polvere in via di formazione, che condensandosi avrebbero dato origine prima a planetesimali, poi a pianeti.

La teoria di Weizsacker di per sé non risolveva la questione del momento angolare dei pianeti più di quanto non lo facesse la versione laplaciana, tanto più semplice. L'astrofisico svedese Hannes Alfven ha preso in considerazione il campo magnetico del sole: quando il giovane sole ruotava velocemente, il suo campo magnetico agiva come un freno rallentandolo, e il momento angolare è stato trasferito ai pianeti. Hoyle ha ulteriormente elaborato quest'idea, così che la teoria di Weizsacker, modificata in modo da tener conto tanto delle forze gravitazionali che di quelle magnetiche, appare oggi quella che meglio spiega l'origine del sistema solare.

IL SOLE.

Il sole è palesemente la fonte della luce, del calore e della stessa vita sulla terra, e anche l'umanità preistorica deve averlo deificato.

Il faraone Ekhnaton, salito al trono dell'Egitto nel 1379 avanti Cristo, il primo monoteista di cui si abbia notizia, considerò il sole come il dio unico. Durante il Medioevo il sole era il simbolo della perfezione, e, anche se non veniva ritenuto una divinità, era certo considerato come l'espressione della perfezione dell'Onnipotente.

Gli antichi greci furono i primi a farsi un'idea della sua distanza reale: le osservazioni di Aristarco dimostrarono che doveva essere lontano come minimo parecchi milioni di chilometri; pertanto, a giudicare dalla sua grandezza apparente, doveva essere più grande della terra. Tuttavia le grandi dimensioni non colpivano in se stesse, perché era naturale supporre che il sole fosse soltanto una grande palla di luce immateriale.

Si dovettero aspettare i tempi di Newton perché risultasse evidente che il sole doveva essere non solo più grande della terra, ma anche dotato di massa molto maggiore, e che la terra gira intorno al sole sotto l'azione dell'intenso campo gravitazionale di quest'ultimo. Oggi sappiamo che il sole dista dalla terra circa 150 milioni di chilometri, e che ha un diametro di un milione 393 mila chilometri, ossia 110 volte il diametro della terra. La sua massa è 330 mila volte la massa della terra e 745 volte quella di tutti i pianeti messi insieme. In altre parole, il sole contiene circa il 99,86 per cento di tutta la materia del sistema solare e ne è il membro di gran lunga principale.

Non dobbiamo, però, lasciarci impressionare dalla sua grandezza. Il sole non è certamente un corpo perfetto, se con ciò intendiamo (come facevano gli studiosi del Medioevo) che esso abbia una luminosità uniforme e sia privo di macchie.

Verso la fine del 1610, Galileo usò il suo telescopio per osservare il sole attraverso la foschia del tramonto, e scorse tutti i giorni delle macchie scure sul disco solare. Osservando lo

spostamento continuo delle macchie sulla superficie solare e il loro disporsi di scorcio via via che si avvicinavano al bordo del disco, Galileo decise che le macchie appartenevano alla superficie solare e che il sole compiva una rotazione intorno al proprio asse in un tempo leggermente superiore a venticinque giorni terrestri.

Naturalmente le conclusioni di Galileo suscitarono una notevole opposizione, perché, rispetto alle concezioni tradizionali, apparivano blasfeme. Un astronomo tedesco, Christoph Scheiner, che pure osservò le macchie, suggerì che non facessero parte del sole, ma fossero dei piccoli corpi in orbita intorno a esso, che apparivano scuri contro lo sfondo del luminoso disco solare. Tuttavia fu Galileo a vincere la disputa.

Nel 1774 un astronomo scozzese, Alexander Wilson, osservò che una grande macchia vicina al bordo del sole, dove la si vedeva lateralmente, appariva concava, come se fosse un cratere. Questa osservazione fu ripresa nel 1795 da Herschel, che suggerì che il sole fosse un corpo freddo e scuro, circondato da uno strato di gas fiammeggianti. Le macchie solari, secondo questa concezione, erano buchi che lasciavano vedere il corpo freddo sottostante. Herschel congetturò che il corpo freddo potesse perfino essere abitato da esseri viventi. (Si osservi come anche i più brillanti scienziati possano uscire in affermazioni arrischiate, che appaiono ragionevoli alla luce delle nozioni del loro tempo, ma risultano ridicolmente errate quando si accumulano ulteriori conoscenze sull'argomento.)

In realtà, le macchie solari non sono veramente nere. Sono aree della superficie solare più fredde delle altre, ed è per questo che in confronto appaiono scure. Quando però Mercurio o Venere vengono a trovarsi tra noi e il sole, appaiono sullo sfondo del disco solare come piccoli cerchi realmente neri; e se uno di questi cerchi nel suo moto arriva vicino a una macchia solare, ci si può accorgere che la macchia non è veramente nera.

Anche le idee completamente errate possono comunque risultare utili: l'idea di Herschel, infatti, servì ad accrescere l'interesse per le macchie solari.

La scoperta veramente importante, però, venne da un farmacista tedesco, Heinrich Samuel Schwabe, che si occupava di astronomia per hobby. Dato che lavorava tutto il giorno, non poteva stare alzato tutta la notte a guardare le stelle. Egli cercò allora un compito che si potesse svolgere di giorno, e decise di osservare il disco solare alla ricerca di pianeti prossimi al sole che dimostrassero la propria esistenza nel passargli davanti.

Nel 1825 cominciò a osservare il sole, e non poté fare a meno di notare le macchie solari. Dopo un po', si dimenticò dei pianeti e cominciò a fare degli schizzi delle macchie solari, che cambiavano di forma e di posizione da un giorno all'altro. Schwabe trascorse non meno di diciassette anni a osservare il sole in tutte le giornate che non erano completamente nuvolose.

Nel 1843 fu in grado di annunciare che le macchie solari non comparivano del tutto a casaccio, ma seguivano un ciclo. Anno dopo anno, il loro numero aumentava sempre più, fino a raggiungere un massimo; poi il loro numero diminuiva finché non ve ne era più quasi nessuna; dopo di che aveva inizio un nuovo ciclo. Oggi sappiamo che il ciclo, pur essendo piuttosto irregolare, dura in media undici anni. L'annuncio di Schwabe fu ignorato (era solo un farmacista, dopo tutto), fino al giorno in cui il noto scienziato Alexander von Humboldt menzionò il ciclo, nel 1851, nel suo libro "Kosmos", un'ampia rassegna della scienza.

A quell'epoca l'astronomo scozzese-tedesco Johann von Lamont, che stava misurando l'intensità del campo magnetico terrestre, scoprì che esso aumentava e diminuiva in modo regolare. Nel 1852 un fisico britannico, Edward Sabine, fece osservare che questo ciclo coincideva con quello delle macchie solari.

Risultò così evidente che le macchie solari esercitano un'influenza sulla terra, e si cominciò a studiarle con grande interesse. Si arrivò ad assegnare a ogni anno il cosiddetto "numero delle macchie solari di Zurigo", basato su una formula elaborata per la prima volta nel 1849 da un astronomo svizzero, Rudolf Wolf, che lavorava appunto in quella città. (Egli fu il primo a far notare

che anche la frequenza delle aurore polari aumentava e diminuiva in corrispondenza del ciclo delle macchie solari.)

A quanto sembra, le macchie solari sono connesse al campo magnetico del sole e compaiono nel punto di emersione delle linee di forza magnetiche. Nel 1908, tre secoli dopo la scoperta delle macchie solari, G. E. Hale scoprì un forte campo magnetico a esse associato.

Perché mai il campo magnetico del sole debba comportarsi come si comporta, emergendo dalla superficie nei momenti e nei luoghi più imprevedibili, aumentando e diminuendo di intensità secondo un ciclo abbastanza irregolare, resta tra gli enigmi relativi al sole che fino a oggi hanno resistito alle capacità umane di soluzione.

Nel 1893 l'astronomo inglese Edward Walter Maunder, che stava riesaminando vecchi dati per ricostruire quale fosse stato il ciclo delle macchie solari nel primo secolo dopo la scoperta di Galileo, rimase sorpreso nello scoprire che non esistevano in pratica resoconti intorno alle macchie solari negli anni compresi tra il 1645 e il 1715.

Astronomi di grande valore come Cassini avevano cercato le macchie e avevano commentato il fatto di non essere riusciti a vederne. Maunder rese nota questa scoperta nel 1894 e tornò a insistervi ancora nel 1922, ma al suo lavoro non venne prestata alcuna attenzione. Il ciclo delle macchie solari era accertato così bene che sembrava incredibile che ci potesse essere stato un periodo di settant'anni in cui non ne era comparsa alcuna.

Negli anni settanta l'astronomo americano John A. Eddy si imbatté casualmente nella memoria di Maunder e, controllandone il contenuto, scoprì che sembrava effettivamente che ci fosse stato quello che venne poi chiamato un "minimo di Maunder". Eddy non solo ripeté le ricerche dell'astronomo inglese, ma esaminò le relazioni di avvistamenti di macchie solari particolarmente grandi compiuti a occhio nudo in varie regioni, ivi compreso l'Estremo Oriente - dati di cui Maunder non poteva disporre. Si tratta di documenti che risalgono fino al quinto secolo avanti Cristo e in genere testimoniano da cinque a dieci avvistamenti per secolo. Vi sono delle lacune, una delle quali coincide proprio con il minimo di Maunder.

Eddy controllò anche le relazioni sulle aurore. Queste ultime aumentano e diminuiscono di frequenza e di intensità con il ciclo delle macchie solari. Risultò che vi erano molte relazioni dopo il 1715 e non poche prima del 1645, ma assolutamente nessuna nell'intervallo tra queste due date.

Inoltre, quando il sole ha un'intensa attività magnetica e vi sono molte macchie solari, la corona è piena di filamenti luminosi ed è assai bella da vedersi. Quando invece le macchie sono assenti, la corona appare come una foschia informe. La corona diventa visibile durante le eclissi di sole; ora, se è vero che raramente gli astronomi del diciassettesimo secolo facevano dei viaggi per assistere a queste eclissi, è pure vero che i pochi resoconti del periodo corrispondente al minimo di Maunder parlavano invariabilmente di corone del tipo associato a scarsezza o ad assenza di macchie solari.

Infine, in corrispondenza dei massimi di attività delle macchie solari, si verifica una catena di eventi che portano alla produzione di carbonio-14 (una varietà di carbonio di cui parlerò nel prossimo capitolo) in quantità minori di quelle abituali. È possibile analizzare gli anelli degli alberi per stabilire il relativo contenuto di carbonio-14 e valutare l'esistenza di massimi e minimi nelle macchie solari in corrispondenza della diminuzione o dell'aumento del carbonio-14. Anche da questa analisi si sono ottenute conferme dell'esistenza del minimo di Maunder, anzi di numerosi minimi di Maunder nei secoli precedenti.

Secondo Eddy, nel corso degli ultimi cinquemila anni ci sarebbero stati circa dodici periodi in cui vi furono minimi di Maunder, di una durata che andava da cinquant'anni a un paio di secoli ciascuno. Per esempio vi fu uno di questi periodi tra il 1400 e il 1510.

Dal momento che i cicli delle macchie solari hanno un effetto sulla terra, possiamo chiederci quale sia l'effetto dei minimi di Maunder. Potrebbe darsi che siano associati a periodi di freddo. Nel primo decennio del diciottesimo secolo gli inverni furono talmente rigidi in Europa che tale periodo

fu chiamato "piccola era glaciale". Fece freddo anche durante il minimo 1400-1510, allorché la colonia norvegese in Groenlandia si estinse proprio per le pessime condizioni meteorologiche.

LA LUNA.

Quando, nel 1543, Copernico pose il sole al centro del sistema solare, solo la luna conservò un rapporto di subordinazione con la terra, che per tanto tempo era stata ritenuta al centro.

La luna gira intorno alla terra in 27,32 giorni (rispetto alle stelle). Inoltre essa ruota intorno al proprio asse esattamente nello stesso periodo. Da questa uguaglianza tra il periodo di rivoluzione e quello di rotazione dipende il fatto che essa presenti sempre la stessa faccia alla terra. Il sincronismo tra rotazione e rivoluzione non è casuale, ma è conseguenza dell'effetto di marea della terra sul suo satellite, come spiegherò in seguito.

La rivoluzione della luna rispetto alle stelle costituisce il "mese siderale". Tuttavia, mentre la luna ruota intorno alla terra, quest'ultima ruota intorno al sole; nel tempo impiegato dalla luna a compiere una rivoluzione intorno alla terra, il sole si è sensibilmente spostato sullo sfondo del cielo, a causa del moto della terra (che ha trascinato la luna con sé). La luna deve continuare il proprio moto di rivoluzione ancora per due giorni e mezzo circa per rimettersi alla pari con il sole e recuperare la posizione che aveva un mese prima rispetto a esso. La rivoluzione della luna intorno alla terra rispetto al sole costituisce il "mese sinodico", che è di 29,53 giorni.

Il mese sinodico è stato senz'altro più importante per l'umanità del mese siderale, perché la faccia della luna che noi vediamo mentre essa compie la sua rivoluzione intorno alla terra riceve la luce solare secondo un angolo che varia in continuazione; e questo angolo dipende dalla rivoluzione rispetto al sole. La luna così passa attraverso una successione di diverse "fasi". All'inizio del mese, la luna è situata immediatamente a est del sole e appare come una falce sottilissima visibile subito dopo il tramonto. Da una notte all'altra la luna si allontana dal sole, mentre la falce si allarga, finché la porzione illuminata della luna è diventata un semicerchio; poi prosegue ancora nella sua crescita. Quando la luna ha raggiunto la regione del cielo diametralmente opposta a quella in cui si trova il sole, la luce di quest'ultimo scavalca, per così dire, la terra e tutta la faccia visibile della luna è illuminata: quel cerchio completo di luce è la "luna piena".

Poi l'ombra passa dalla parte della luna dove aveva iniziato ad apparire la falce luminosa: notte dopo notte, diminuisce la porzione di luna illuminata, finché si riduce di nuovo a metà della luna piena, ma ora la parte illuminata è quella opposta rispetto alla fase crescente. Infine la luna si porta immediatamente a ovest del sole e fa la sua comparsa nel cielo subito prima dell'alba, come una falce la cui curvatura è rivolta nella direzione opposta a quella che aveva all'inizio. A questo punto la luna passa al di là del sole e la sua falce diventa visibile subito dopo il tramonto; così ricomincia da capo tutta la successione delle fasi.

L'intero ciclo dura 29 giorni e mezzo, cioè appunto la lunghezza del mese sinodico, che era alla base dei primi calendari.

Gli uomini all'inizio credettero che la luna crescesse e calasse davvero, ingrandendosi e riducendosi col mutare delle fasi. Si suppose addirittura che ogni volta che la falce lunare tornava ad apparire nel cielo occidentale dopo il tramonto, essa fosse letteralmente una "luna nuova", tanto che ancora oggi la si chiama così.

Gli antichi astronomi greci compresero tuttavia che la luna doveva essere un globo, che i cambiamenti di fase derivavano dal fatto che essa splendeva solo di luce solare riflessa e che il mutare della posizione della luna nel cielo rispetto al sole spiegava esattamente le fasi lunari. Questo fu un fatto di grande importanza. I filosofi greci, e in particolare Aristotele, cercarono di stabilire una differenza tra la terra e i corpi celesti dimostrando che le proprietà del nostro mondo erano del tutto diverse da quelle che avevano in comune i corpi celesti. Così, la terra era scura e non emetteva luce, mentre i corpi celesti emettevano tutti luce. Aristotele riteneva che i corpi celesti fossero fatti di una sostanza che egli chiamò "etere" (da una parola greca che significava

«splendente» o «ardente»), essenzialmente diversa dai materiali che costituivano la terra. Eppure il ciclo delle fasi della luna dimostrava che essa, come la terra, non emetteva luce propria e splendeva soltanto perché rifletteva la luce solare. Quindi, almeno sotto questo aspetto, la luna era simile alla terra.

Ma vi era di più: di tanto in tanto il sole e la luna si trovavano così esattamente in opposizione rispetto alla terra, che la luce del sole veniva intercettata dalla terra stessa e non riusciva a raggiungere la luna. Questa (sempre nella fase di luna piena) attraversava l'ombra della terra e veniva eclissata.

In epoche primitive si pensava che la luna venisse ingoiata da una forza malefica, e scomparisse completamente, per sempre. Era un fenomeno terrificante; e fu una delle prime vittorie della scienza quella di riuscire a predire un'eclissi, dimostrando così che si trattava di un fenomeno naturale, con una spiegazione facilmente comprensibile. (Alcuni pensano che Stonehenge fosse, tra l'altro, un osservatorio dell'Età della Pietra che poteva essere usato per predire le eclissi lunari in base al mutare delle posizioni del sole e della luna rispetto alle pietre, poste a intervalli regolari, che formavano quella struttura.)

In realtà, quando la luna ha l'aspetto di una falce, è talora possibile scorgerne la parte restante debolmente illuminata da una luce rossastra. Fu Galileo a intuire che la terra, come la luna, doveva riflettere la luce del sole e splendere nel cielo, e che la porzione della luna che non era illuminata dal sole doveva essere debolmente illuminata dalla terra. Questo fenomeno sarebbe stato osservabile solo quando la porzione illuminata dal sole era così piccola che la sua luce non sommergeva quella, molto più debole, proveniente dalla terra. Dunque, non soltanto la luna non era luminosa (come non lo è la terra), ma anzi la terra rifletteva la luce solare e doveva presentare delle fasi, proprio come la luna (se vista da quest'ultima).

Un'altra differenza fondamentale che si supponeva esistesse tra la terra e i corpi celesti era che l'una fosse imperfetta e soggetta a perenne mutamento, mentre gli altri erano perfetti e immutabili. Solo il sole e la luna appaiono a occhio nudo come qualcosa di più che semplici punti luminosi. Dei due, il sole appare come un cerchio perfetto di luce incontaminata; la luna, invece - anche non tenendo conto delle fasi -, non è perfetta. Quando splende la luna piena, che appare come un cerchio perfetto, tuttavia è evidente che essa non è veramente perfetta. Sulla sua superficie che splende senza abbagliare si scorgono delle macchie, incompatibili con il concetto di perfezione. Gli uomini primitivi rappresentarono queste macchie in modo diverso in ogni diversa cultura. L'amore dell'uomo per se stesso è tale che la gente ha creduto spesso di riconoscervi l'immagine di un essere umano, e ancora oggi parliamo della «faccia della luna».

Fu Galileo a guardare per la prima volta, nel 1609, il cielo con un telescopio: rivolgendolo in direzione della luna, vi scorse montagne, crateri e zone di pianura (che egli ritenne fossero mari). Questo chiariva in modo definitivo che la luna non era un corpo celeste «perfetto», fondamentalmente diverso dalla terra, ma era invece simile al nostro pianeta.

Tuttavia questa comprensione non bastò per demolire del tutto la concezione tradizionale. I greci avevano osservato che vi erano nel cielo parecchi oggetti che mutavano continuamente di posizione rispetto all'insieme delle stelle, e che tra questi la luna era quella che mutava la sua posizione più rapidamente. Essi supposero che ciò accadesse perché la luna era più prossima alla terra di qualsiasi altro corpo celeste (e in questo i greci avevano ragione). Si poteva allora sostenere che la luna, a causa della sua prossimità alla terra, fosse in qualche modo contaminata dalle imperfezioni di quest'ultima, che insomma risentisse di questa vicinanza. Fu solo quando Galileo scoprì le macchie sul sole che il concetto di perfezione celeste entrò veramente in crisi.

MISURE RELATIVE ALLA LUNA.

Se la luna era il corpo più vicino alla terra, restava da sapere di quanto le fosse vicino. Tra gli astronomi greci che cercarono di determinare tale distanza, fu Ipparco ad arrivare alla risposta

sostanzialmente esatta. Oggi si sa che la distanza media della luna dalla terra è di 384403 chilometri, ossia circa 9,6 volte la circonferenza terrestre.

Se l'orbita della luna fosse circolare, questa sarebbe la sua distanza in ogni momento. Ma la sua orbita è invece leggermente ellittica, e la terra non si trova al centro di tale ellisse, ma in uno dei fuochi, che sono spostati rispetto al centro. La luna si avvicina leggermente alla terra durante una metà della sua orbita e se ne allontana percorrendo l'altra metà; quando si trova nel punto più vicino (il perigeo), la luna dista da noi 356460 chilometri, mentre nel punto più lontano (apogeo) dista 406670 chilometri.

La luna è, come i greci già sapevano, il corpo celeste di gran lunga più vicino alla terra. Anche lasciando da parte le stelle e riferendoci al solo sistema solare, la luna è, in termini relativi, dietro l'angolo.

Il diametro della luna (valutato in base alla sua distanza e al diametro apparente) è di 3476 chilometri: cioè 3,65 volte minore di quello del globo terrestre e 412 volte minore di quello del sole. Si dà il caso che la distanza del sole dalla terra sia circa 390 volte la distanza media della luna, così che le differenze di diametro e di distanza si controbilanciano quasi esattamente, e i due corpi, le cui dimensioni reali sono tanto diverse, appaiono nel cielo di grandezza quasi uguale. È per questa ragione che, quando la luna si trova davanti al sole, il suo corpo, che è più piccolo ma anche più vicino, può sovrapporsi così esattamente a quello più grande ma più lontano del sole, facendo dell'eclissi di sole quello spettacolo meraviglioso che conosciamo. È una sorprendente coincidenza a offrirci tale spettacolo.

VIAGGI VERSO LA LUNA.

La relativa vicinanza della luna e il grande risalto che essa ha nel cielo hanno da sempre stimolato l'immaginazione umana. Esisteva un modo per raggiungerla? (La stessa domanda avrebbe potuto sorgere a proposito del sole, ma era così evidente che esso doveva essere caldissimo, che ciò servì a raffreddare qualsiasi desiderio di raggiungerlo. Era chiaro che la luna costituiva una meta molto più ospitale, oltre che molto più vicina.)

Nei tempi antichi raggiungere la luna non doveva apparire un'impresa impossibile, dato che si supponeva che l'atmosfera si estendesse fino ai corpi celesti, e quindi qualsiasi cosa capace di sollevare un uomo nell'aria avrebbe potuto benissimo portarlo, al limite, fino alla luna.

Così, nel secondo secolo dopo Cristo, lo scrittore di origine siriaca Luciano di Samosata scrisse il primo racconto che conosciamo in cui si parli di un viaggio spaziale: una nave viene afferrata da una tromba marina che la fa sollevare nell'aria, così in alto da raggiungere la luna.

Molto più tardi, nel 1638, comparve "Man in the Moon" (L'uomo nella luna), di un religioso inglese, Francis Godwin (che morì prima della sua pubblicazione). Godwin fa arrivare il suo eroe sulla luna con un carro tirato da grandi oche che ogni anno la raggiungono nelle loro migrazioni.

Nel 1643, tuttavia, si arrivò a comprendere la natura della pressione atmosferica e si vide ben presto che l'atmosfera non poteva estendersi al di là di pochi (relativamente) chilometri sopra la superficie terrestre. Quasi tutto lo spazio compreso tra la terra e la luna era vuoto, così che non potevano penetrarvi trombe marine né volarvi oche. Il problema di raggiungere la luna divenne improvvisamente molto più arduo, ma sempre non insuperabile.

Nel 1649 apparve il libro "Gli stati e imperi della luna", dello scrittore e spadaccino francese Cyrano de Bergerac. Nel suo racconto, Cyrano elenca sette modi con cui sarebbe possibile raggiungere la luna. Sei di questi erano assolutamente sbagliati per una ragione o per l'altra, ma il settimo metodo si basava sull'uso di razzi. I razzi costituivano in effetti l'unico metodo conosciuto all'epoca (e per la verità, anche oggi) per potersi spostare nel vuoto.

La base teorica dei razzi non fu però compresa che nel 1687, quando Newton pubblicò la sua grande opera, "Principia Mathematica", nella quale, tra l'altro, esponeva le sue tre leggi del moto. La terza legge è comunemente nota come legge di azione e reazione: quando si applica una

forza in una direzione, una forza uguale agisce nella direzione opposta. Quindi, se un razzo emette una certa quantità di materia in una direzione, si sposterà in direzione opposta, e lo farà tanto nel vuoto che nell'aria. Anzi, lo farà più facilmente nel vuoto, in cui manca la resistenza dell'aria al moto. (La diffusa credenza che il razzo abbia bisogno di qualcosa «contro cui far forza» è erronea.)

I RAZZI.

I razzi non erano del resto solo una questione teorica: ne esistevano secoli prima che Cyrano scrivesse e Newton teorizzasse.

I cinesi fin dal tredicesimo secolo avevano inventato e usato dei piccoli razzi per la guerra psicologica - cioè per spaventare i nemici. La civiltà occidentale moderna ha convertito i razzi a scopi più cruenti: nel 1801, un esperto inglese di artiglieria, William Congreve, avendo sentito parlare dell'uso dei razzi in Oriente, dove le truppe indiane li avevano lanciati contro gli inglesi intorno al 1780, ideò diversi missili micidiali. Alcuni di questi furono usati contro gli Stati Uniti nella guerra del 1812, più precisamente per bombardare Fort McHenry nel 1814, fatto che ispirò Francis Scott Key a cantare il «rosso bagliore dei razzi» in "Star-Spangled Banner". Le armi a razzo persero di importanza di fronte ai progressi dell'artiglieria convenzionale in fatto di gittata, precisione e potenza. Tuttavia la seconda guerra mondiale vide lo sviluppo del bazooka americano e della «katiuscia» sovietica, che sono entrambi essenzialmente cariche esplosive spinte da razzi. Anche gli aerei a reazione, su scala molto maggiore, applicano il principio di azione e reazione dei razzi.

Verso l'inizio del ventesimo secolo, due uomini concepirono indipendentemente un uso nuovo e più sofisticato dei razzi - per l'esplorazione delle zone superiori dell'atmosfera e dello spazio.

Erano un russo, Konstantin Eduardovic' Tsiolkovsky, e un americano, Robert Hutchings Goddard. (È davvero strano, in vista degli sviluppi successivi, che un russo e un americano siano stati i primi araldi dell'era della missilistica, anche se un inventore tedesco dotato di grande immaginazione, Hermann Ganswindt, avanzò anch'egli, in quella stessa epoca, delle proposte ancora più ambiziose, benché meno sistematiche e scientifiche.)

Il russo fu il primo a fare delle sue congetture e dei suoi calcoli oggetto di pubblicazione, fra il 1903 e il 1913, mentre Goddard pubblicò solo nel 1919. Ma Goddard fu il primo a mettere in pratica le speculazioni teoriche: il 16 marzo del 1926, da una fattoria coperta di neve ad Auburn, nel Massachusetts, sparò un razzo che raggiunse i 60 metri di altezza. La cosa notevole del suo razzo era che veniva azionato da un propellente liquido, e non da polvere da sparo.

Inoltre, mentre i razzi ordinari, i bazooka e gli aerei a reazione fanno uso dell'ossigeno dell'aria circostante, il razzo di Goddard, progettato per funzionare nello spazio esterno, doveva trasportare anche il carburante sotto forma di ossigeno liquido ("lox", come viene chiamato oggi nel gergo degli addetti ai lavori). Nel diciannovesimo secolo Jules Verne, in un romanzo di fantascienza, aveva pensato di ricorrere a un cannone per lanciare un veicolo verso la luna: ma un cannone fornisce tutta l'energia in una volta, alla partenza, quando l'atmosfera è più densa e offre la massima resistenza. Inoltre, usando il cannone si ottiene al momento della partenza tutta l'accelerazione necessaria, ed essa è tale da stritolare qualsiasi essere umano posto all'interno della navicella spaziale, trasformandolo in una poltiglia sanguinolenta di carne e ossa.

I razzi di Goddard invece si alzavano lentamente, per poi guadagnare in velocità e fornire la spinta finale nell'atmosfera più rarefatta, in cui la resistenza è bassa. Aumentando gradualmente la velocità si può mantenere l'accelerazione a livelli sopportabili, cosa molto importante nel caso di veicoli occupati da esseri umani.

Sfortunatamente le realizzazioni di Goddard non ricevettero alcun riconoscimento, se non da parte dei suoi vicini inferociti, che si rivolsero alle autorità affinché lo costringessero ad andare a fare i suoi esperimenti altrove. Goddard proseguì lanciando i suoi razzi in luoghi più appartati; tra il

1930 e il 1935, i suoi veicoli raggiunsero velocità prossime ai 900 chilometri all'ora e altezze fino a 2400 metri. Goddard sviluppò anche sistemi per dirigere un razzo in volo e usò dei giroscopi per mantenerlo nella direzione voluta.

Inoltre brevettò l'idea dei razzi a più stadi. Dato che a ogni stadio successivo un razzo perde parte del proprio peso mentre sfrutta l'elevata velocità impressa dallo stadio precedente, un razzo composto da diversi stadi può raggiungere velocità e altezze molto superiori a quelle di un razzo in cui la stessa quantità di combustibile venga usata in un unico stadio.

Durante la seconda guerra mondiale, la marina statunitense sostenne, anche se con scarsa convinzione, ulteriori esperimenti di Goddard.

Nello stesso periodo il governo tedesco concentrò grandi sforzi nella ricerca missilistica; i ricercatori erano un gruppo di giovani che si ispiravano soprattutto al lavoro di Hermann Oberth, un matematico romeno che, nel 1923, aveva scritto sull'argomento dei razzi e dei veicoli spaziali indipendentemente da Tsiolkovsky e Goddard. La ricerca in Germania ebbe inizio nel 1935 e culminò nella realizzazione della V-2. Sotto la guida dell'esperto di missilistica Wernher von Braun (che, dopo la seconda guerra mondiale, avrebbe messo il suo talento a disposizione degli Stati Uniti), nel 1942 venne lanciato il primo vero missile a razzo. La V-2 divenne operativa nel 1944, troppo tardi perché i nazisti vincessero la guerra, benché arrivassero a lanciarne complessivamente 4300, delle quali 1230 colpirono Londra. I missili di von Braun uccisero 2511 inglesi e ne ferirono seriamente altri 5869.

Il 10 agosto 1945, quasi lo stesso giorno della fine della guerra, Goddard morì - appena in tempo per vedere finalmente divampare la scintilla da lui accesa. Gli Stati Uniti e l'Unione Sovietica, stimolati dal successo della V-2, si impegnarono a fondo nella ricerca sui razzi, cercando ciascuno di accaparrarsi il maggior numero possibile di esperti tedeschi.

In un primo tempo gli Stati Uniti usarono le V-2 di cui erano venuti in possesso per esplorare gli strati superiori dell'atmosfera; ma nel 1952 tale scorta si esaurì. In seguito vennero costruiti razzi vettori sempre più grandi e più avanzati tanto negli Stati Uniti quanto in Unione Sovietica, e il progresso divenne continuo.

ESPLORAZIONE DELLA LUNA.

Una nuova era ebbe inizio allorché, il 4 ottobre 1957 (a meno di un mese dal centenario della nascita di Tsiolkovsky), l'Unione Sovietica mise in orbita il primo satellite artificiale, lo "Sputnik Primo". Esso ruotava intorno alla terra seguendo un'orbita ellittica - a una distanza di 250 chilometri dalla superficie della terra (o di 6600 chilometri dal suo centro) al perigeo e di 900 chilometri all'apogeo.

Un'orbita ellittica è in un certo senso simile al percorso di un ottovolante. Spostandosi dall'apogeo al perigeo, il satellite va in discesa, per così dire, e la sua energia potenziale gravitazionale diminuisce; la velocità, di conseguenza, aumenta, così che al perigeo, quando il satellite inizia a risalire, la sua velocità è massima, proprio come accade in un ottovolante. Il satellite perde velocità nel salire (di nuovo come l'ottovolante) e quando raggiunge l'apogeo la sua velocità è minima: da lì ricomincia la discesa verso il basso.

Lo "Sputnik Primo" attraversava, al perigeo, gli strati rarefatti dell'alta atmosfera; la resistenza dell'aria, anche se scarsa, era sufficiente a rallentare un poco il satellite a ogni giro. Pertanto lo "Sputnik Primo" non riusciva a raggiungere, a ogni rivoluzione, l'altezza che aveva all'apogeo della rivoluzione precedente, ma scendeva lentamente descrivendo una spirale. Alla fine perse tanta energia che l'attrazione terrestre ebbe il sopravvento, facendolo penetrare negli strati più densi dell'atmosfera, dove bruciò in conseguenza dell'attrito dell'aria.

La rapidità con cui l'orbita di un satellite degenera nel modo appena descritto dipende in parte dalla massa del satellite, in parte dalla sua forma e in parte dalla densità dell'aria che attraversa. Questo consente di calcolare la densità dell'atmosfera a un dato livello. I satelliti ci

hanno fornito le prime misurazioni dirette della densità dell'atmosfera superiore, la quale è risultata più elevata di quanto si era creduto; tuttavia, all'altezza di 240 chilometri, per esempio, è ugualmente solo un decimilionesimo della densità al livello del mare, e a 360 chilometri è solo un trilionesimo.

Non si devono, però, considerare troppo sbrigativamente irrilevanti queste piccolissime quantità d'aria: perfino a un'altezza di 1600 chilometri, dove la densità dell'atmosfera è solo un quadrilionesimo di quella a livello del mare, il tenue filo di aria esistente ha una densità che è un miliardo di volte quella dei gas nello spazio esterno. L'involucro gassoso che circonda la terra si estende fino a grandi distanze.

L'Unione Sovietica non rimase a lungo sola in questo campo: nel giro di quattro mesi gli Stati Uniti la raggiunsero, mettendo in orbita, il 30 gennaio 1958, il loro primo satellite, l'"Explorer Primo".

Dopo che furono messi in orbita intorno alla terra i primi satelliti, gli occhi si appuntarono sulla luna con desiderio ancora più intenso, anche se la luna aveva perso un po' del suo fascino, perché, pur essendo un mondo e non solo una luce nel cielo, non era più quel mondo di cui si era fantasticato in precedenza.

Prima del telescopio di Galileo si era sempre pensato che, se i corpi celesti erano dei mondi, dovevano certamente essere popolati da esseri viventi, che potevano essere degli umanoidi intelligenti. I primi racconti di fantascienza sulla luna davano per scontato qualcosa del genere, e altrettanto facevano i successivi, in pieno ventesimo secolo.

Nel 1835 uno scrittore inglese, Richard Adams Locke, aveva scritto una serie di articoli per il «New York Sun», in cui si pretendeva di riferire che seri studi scientifici della superficie della luna avevano portato alla scoperta di molte specie di esseri viventi. Le descrizioni erano dettagliate: milioni di persone vi credettero immediatamente.

Eppure non era occorso molto tempo, da quando Galileo aveva osservato il nostro satellite con il telescopio, per capire che non poteva esistere vita sulla luna. La sua superficie non era mai nascosta da nuvole o nebbie. La linea di separazione tra l'emisfero scuro e quello illuminato era sempre netta, così che non vi era crepuscolo osservabile. I «mari» oscuri, ritenuti da Galileo masse di acqua, erano risultati luoghi cosparsi di piccoli crateri: si trattava, al massimo, di masse di sabbia relativamente piane. Ben presto apparve evidente che sulla luna non c'erano né acqua né aria - quindi, nessun genere di vita.

Tuttavia questa conclusione era forse affrettata. Che cosa si sapeva della faccia nascosta della luna, mai vista da essere umano? Non poteva darsi che vi fossero sotto la superficie piccole quantità di acqua che, se insufficienti per alimentare forme complesse di vita, potevano forse sostentare l'equivalente dei batteri? Oppure, anche ammesso che non esistesse affatto la vita, non potevano esserci nel suolo delle sostanze chimiche che rappresentassero una lenta e forse abortita evoluzione verso la vita? Ma, anche se non c'era nulla di simile, attendevano ancora risposta molte domande sulla luna che non avevano niente a che fare con la vita. Dove si era formata? Qual era la sua struttura mineralogica? Quale la sua età?

Pertanto, non molto tempo dopo il lancio di "Sputnik Primo", si cominciò a usare la nuova tecnica per esplorare la luna. La prima "sonda lunare" - cioè, il primo satellite destinato a passare vicino alla luna - fu lanciata con pieno successo dall'Unione Sovietica il 2 gennaio 1959. Era "Lunik Primo", il primo oggetto costruito dall'uomo a entrare in orbita intorno al sole. Entro due mesi gli Stati Uniti avrebbero fatto altrettanto.

Il 12 settembre 1959 i sovietici lanciarono "Lunik Secondo" e lo diressero in modo che centrasse la luna. Per la prima volta nella storia, un oggetto fabbricato dall'uomo andava a posarsi sulla superficie di un altro mondo. Poi, un mese dopo, il satellite sovietico "Lunik Terzo" passò dietro la luna e puntò una telecamera sulla faccia invisibile dalla terra. Per quaranta minuti le immagini dell'altra faccia della luna furono ritrasmesse a terra da una distanza di 64 mila chilometri dalla superficie lunare. Erano confuse, di cattiva qualità, ma mostravano qualcosa di interessante.

L'altra faccia della luna era quasi priva di «mari» del tipo che siamo abituati a scorgere sulla faccia visibile dalla terra. La ragione di tale asimmetria non è del tutto chiara. Presumibilmente i mari si sono formati relativamente tardi nella storia della luna, quando una sua faccia era già rivolta permanentemente verso la terra, e i grandi meteoriti che hanno determinato la formazione dei mari furono deviati dalla gravità terrestre verso la faccia lunare a noi più vicina.

Ma l'esplorazione lunare era solo all'inizio. Nel 1964 gli Stati Uniti lanciarono una sonda, "Ranger 7", destinata a colpire la superficie lunare, scattando delle fotografie durante l'avvicinamento. Il 31 luglio 1964 la sonda portò felicemente a termine la sua missione, avendo ripreso 4316 immagini di una zona oggi chiamata Mare Cognitum (mare noto). All'inizio del 1965, "Ranger 8" e "Ranger 9" colsero un successo se possibile ancora maggiore. Queste sonde lunari rivelarono che la superficie della luna era compatta (o nel peggiore dei casi sassosa) e non già ricoperta dallo spesso strato di polvere di cui alcuni astronomi avevano supposto l'esistenza. Le sonde mostrarono che anche quelle aree che al telescopio apparivano più piatte erano in realtà disseminate di crateri troppo piccoli per essere visibili dalla terra.

La sonda sovietica "Luna Nona" riuscì a effettuare un "allunaggio morbido" (cioè senza distruggersi) il 3 febbraio 1966 e trasmise fotografie scattate al livello del suolo. Il 3 aprile 1966 i sovietici collocarono "Luna Decima" in un'orbita circumlunare che veniva percorsa in tre ore; la sonda misurava la radioattività emessa dalla superficie lunare: da tale misurazione si dedusse che le rocce della superficie erano simili al basalto che giace sul fondale degli oceani terrestri.

Gli esperti americani proseguirono in questa stessa direzione con lanci basati su una tecnologia ancor più sofisticata. Il primo allunaggio morbido americano fu quello di "Surveyor 1", il primo giugno del 1966. Nel settembre del 1967 "Surveyor 5" prelevava e analizzava campioni di terreno lunare sotto controllo-radio dalla terra. Il terreno si dimostrò realmente di tipo basaltico e si vide che conteneva particelle di ferro, probabilmente di origine meteorica.

Il 10 agosto 1966 vennero messe in orbita intorno alla luna le prime sonde americane. Questi Lunar Orbiters scattarono dettagliate fotografie di ogni parte del nostro satellite, e si pervenne così a una conoscenza estremamente particolareggiata delle caratteristiche della sua superficie (anche nella parte che rimane permanentemente nascosta alla nostra vista). Inoltre vennero scattate straordinarie fotografie della terra vista dalle vicinanze della luna.

I crateri lunari, detto per inciso, erano stati chiamati con il nome di astronomi e di grandi uomini del passato; poiché la maggior parte di tali nomi erano stati dati dall'astronomo italiano Giovanni Battista Riccioli intorno al 1650, i più grandi crateri erano stati dedicati agli astronomi dell'epoca precedente, come Copernico, Tycho Brahe e Keplero, o a quelli greci, come Aristotele, Archimede e Tolomeo.

L'altra faccia della luna, svelata per la prima volta da "Lunik Terzo", offriva nuove opportunità. I russi, come era loro diritto, assegnarono i nomi ad alcune delle conformazioni lunari più appariscenti. Oltre al cratere Tsiolkovsky (il grande profeta dei viaggi spaziali), si ebbero così anche i crateri Lomonosov e Popov, dedicati a due chimici russi della fine del diciottesimo secolo. Crateri furono dedicati anche a personaggi occidentali, tra cui Maxwell, Hertz, Edison, Pasteur e i Curie, tutti citati in questo libro. Tra i nomi più appropriati comparve quello dello scrittore francese Jules Verne, un vero pioniere della fantascienza.

Nel 1970 si conosceva ormai l'altra faccia della luna abbastanza bene perché fosse possibile denominare i suoi aspetti salienti in modo sistematico. Una commissione internazionale, sotto la guida dell'astronomo americano Donald Howard Menzel, assegnò centinaia di nomi, onorando grandi uomini del passato che avevano contribuito in un modo o nell'altro al progresso della scienza. Crateri molto importanti vennero dedicati a personalità russe come Mendeleev (che fu il primo a elaborare la tavola periodica degli elementi, vedi capitolo sesto) e Gagarin, che era stato il primo uomo a compiere un volo orbitale intorno alla terra, e più tardi era rimasto vittima di un incidente aereo. Altri aspetti salienti della luna permisero di onorare la memoria dell'astronomo olandese Hertzsprung, del matematico francese Galois, del fisico italiano Fermi, del matematico

americano Wiener e del fisico britannico Cockcroft. In un'area limitata possiamo trovare Nernst, Roentgen, Lorentz, Moseley, Einstein, Bohr e Dalton, tutte figure di primo piano nello sviluppo della teoria atomica e nello studio della struttura subatomica.

L'interesse di Menzel per la divulgazione scientifica e per la fantascienza è testimoniato dal fatto che egli abbia voluto, giustamente, dedicare alcuni crateri a coloro che contribuirono a suscitare l'entusiasmo di un'intera generazione per il volo spaziale, in un periodo in cui la scienza ortodossa lo ignorava, considerandolo una chimera. Così un cratere ricorda Hugo Gernsback, che pubblicò le prime riviste negli Stati Uniti dedicate completamente alla fantascienza, e un altro cratere è dedicato a Willy Ley, che, tra tutti gli scrittori, fu quello che con maggior precisione e costanza descrisse le vittorie e le possibilità della missilistica.

GLI ASTRONAUTI E LA LUNA.

Tuttavia, l'esplorazione della luna con sonde senza equipaggio, per esaltante e fruttuosa che potesse risultare, non bastava. Non era possibile che degli esseri umani salissero a bordo dei razzi? Occorsero soltanto tre anni e mezzo dopo il lancio dello "Sputnik Primo" perché si facesse il primo passo in tale direzione.

Il 12 aprile 1961 il cosmonauta sovietico Jurij Alekseevic' Gagarin compì un volo orbitale e fece ritorno sano e salvo. Pochi mesi dopo, il 6 agosto, un altro cosmonauta sovietico, German Stepanovic' Titov, descrisse diciassette orbite prima di atterrare, restando 24 ore in volo libero. Il 20 febbraio 1962 gli Stati Uniti misero per la prima volta un uomo in orbita: l'astronauta John Herschel Glenn compì tre orbite intorno alla terra. Da allora decine di uomini lo hanno seguito, restando, in alcuni casi, nello spazio per mesi. Il 16 giugno 1963 venne lanciata una cosmonauta sovietica, Valentina V. Tereskova, che rimase in volo libero per 71 ore, compiendo in tutto 17 orbite.

Nel 1983, l'astronauta Sally Ride fu la prima donna americana a essere messa in orbita.

Sono stati lanciati anche veicoli spaziali con a bordo due o tre uomini. Il primo di tali lanci fu quello dei cosmonauti sovietici Vladimir M. Komarov, Konstantin P. Feokstitov e Boris G. Yegorov, il 12 ottobre 1964. Gli americani misero in orbita "Virgil Primo". Grissom e John W. Young nella prima missione con più uomini a bordo, effettuata il 23 marzo 1965.

Il primo uomo che uscì dal suo veicolo nello spazio fu il cosmonauta sovietico Alekseij A. Leonov, il 18 marzo 1965. La sua "passeggiata spaziale" fu ripetuta dall'astronauta americano Edward H. White, il 3 giugno 1965.

Anche se fino al 1965 quasi tutte le «prime» nello spazio erano state fatte dai sovietici, in seguito furono gli americani a portarsi all'avanguardia. Veicoli con uomini a bordo fecero manovra nello spazio, furono effettuati dei rendez-vous e degli agganci tra veicoli diversi, e si prese ad avventurarsi a distanze sempre maggiori.

Tuttavia il programma spaziale non fu privo di tragedie. Nel gennaio 1967 tre astronauti americani - Grissom, White e Roger Chaffee - morirono a terra in un incendio scoppiato nella loro capsula spaziale durante prove di routine. Poi, il 23 aprile 1967, Komarov morì per il funzionamento difettoso del suo paracadute durante il rientro. Fu il primo uomo a morire nel corso di un volo spaziale.

Il piano americano per raggiungere la luna con un veicolo con tre uomini a bordo (il programma Apollo) fu rinviato in seguito alla tragedia; si progettarono capsule spaziali diverse che garantissero una maggior sicurezza, ma il programma non venne abbandonato. Il primo veicolo Apollo con uomini a bordo, l'"Apollo 7", venne lanciato l'11 ottobre 1968; comandava l'equipaggio di tre uomini Walter M. Schirra. "Apollo 8", lanciato il 21 dicembre 1968, sotto il comando di Frank Borman giunse vicino alla luna e le girò attorno a breve distanza. Anche "Apollo 10", lanciato il 18 maggio 1969, si accostò alla luna, sganciò il modulo lunare e lo fece scendere a meno di 15 chilometri dalla superficie del satellite.

Infine, il 16 luglio 1969, fu lanciato "Apollo 11", sotto il comando di Neil A. Armstrong. Il 20 luglio Armstrong fu il primo essere umano a mettere piede sul suolo di un altro mondo.

Da allora sono state lanciate altre sei capsule Apollo. Cinque di esse - 12, 14, 15, 16 e 17 - portarono a termine le loro missioni con straordinario successo. "Apollo 13" ebbe dei problemi nello spazio e fu obbligata a far ritorno senza essere atterrata sulla luna, ma riuscì a rientrare senza perdite di vite umane.

Il programma spaziale dei sovietici non ha ancora previsto voli sulla luna con presenza di esseri umani. Tuttavia, il 12 settembre 1970, fu lanciato sul nostro satellite un veicolo senza equipaggio, che dopo un riuscito allunaggio morbido, raccolse e riportò sulla terra campioni di suolo e di rocce. In seguito un veicolo automatizzato sovietico scese sulla luna e si mosse sulla sua superficie per mesi, comandato a distanza, inviando sulla terra numerosi dati.

La conclusione più significativa ottenuta dallo studio delle rocce riportate da queste varie missioni, è che la luna, a quanto pare, è del tutto priva di vita. Sembra che la sua superficie sia stata esposta a un intenso calore, perché è ricoperta da frammenti vetrosi, i quali, a loro volta, sembrano indicare una fusione superficiale delle rocce. Non è stata trovata traccia alcuna di acqua, e neppure qualche indizio che possa esservi dell'acqua sotto alla superficie, o che ve ne sia stata nel passato. Non vi è vita, e neppure traccia di sostanze chimiche che si possano mettere in relazione con la vita.

Dal dicembre 1971 in poi non ci sono più stati allunaggi; e per il momento non ve ne sono neppure in programma. È comunque fuori discussione il fatto che ormai la nostra tecnologia sia in grado di portare degli esseri umani, o le loro macchine, sulla superficie lunare ogniqualvolta ciò appaia desiderabile, e intanto il programma spaziale prosegue in altre direzioni.

VENERE E MERCURIO.

Dei pianeti che girano intorno al sole, due - Venere e Mercurio - gli sono più vicini della terra. Mentre la distanza media della terra dal sole è di circa 150 milioni di chilometri, quella di Venere è di 108 milioni e quella di Mercurio di 58 milioni di chilometri.

Ne consegue che noi non vediamo mai Venere o Mercurio molto distanti dal sole. Venere, vista dalla terra, non può mai apparire distante dal sole più di 47 gradi, e Mercurio più di 28. Quando si trova a est del sole, Venere - o Mercurio - è visibile la sera nella parte occidentale del cielo, dopo il tramonto del sole, che segue in breve tempo, e in tal caso prende la denominazione di "stella della sera".

Quando invece Venere - o Mercurio - sta percorrendo la parte opposta della propria orbita e si trova a occidente del sole, è visibile prima dell'alba, allorché sorge a oriente prima del sole, e scompare poco dopo nello splendore di quest'ultimo: in tal caso prende il nome di "stella del mattino".

In un primo tempo fu naturale credere che le due stelle della sera e le due stelle del mattino fossero quattro stelle distinte. Ma un po' alla volta gli osservatori si accorsero che quando vi era nel cielo una delle stelle della sera, non vi era mai la corrispondente stella del mattino, e viceversa. Si cominciò a comprendere che c'erano due pianeti, ciascuno dei quali faceva la spola da una parte all'altra del sole, fungendo alternativamente da stella della sera e stella del mattino. Il primo greco che espresse quest'idea fu, nel sesto secolo avanti Cristo, Pitagora, il quale forse lo aveva appreso dai babilonesi.

Dei due pianeti, Venere è di gran lunga il più facile da osservare. In primo luogo, è più vicino alla terra. Quando la terra e Venere si trovano dalla stessa parte rispetto al sole, la loro distanza può ridursi anche a soli 40 milioni di chilometri; in quel momento Venere dista da noi soltanto un centinaio di volte più della luna. Nessun corpo celeste di una certa grandezza (eccetto la luna) ci si avvicina più di Venere. La distanza media tra Mercurio e la terra, quando sono dalla stessa parte del sole, è di circa 92 milioni di chilometri.

Oltre a essere più vicina alla terra (per lo meno quando entrambi i pianeti si trovano dalla stessa parte rispetto al sole), Venere è più grande di Mercurio e riceve più luce dal sole. Venere ha un diametro di 12111 chilometri mentre il diametro di Mercurio è di soli 4850 chilometri. Infine, Venere è avvolta da nubi e riflette una frazione maggiore (rispetto a Mercurio) della luce solare che la colpisce. Mercurio non ha atmosfera, così che sono solo le sue rocce a riflettere la luce (come accade anche per la luna).

Ne consegue che Venere, quando è al massimo del suo splendore, ha una magnitudine di meno 4,22: è quindi 12,6 volte più splendente di Sirio, la stella più luminosa; anzi, esclusi il sole e la luna, è l'oggetto più luminoso del cielo. Venere è talmente splendente che in una notte buia, senza luna, può proiettare un'ombra rilevabile. Mercurio, al massimo del suo splendore, ha una magnitudine di meno 1,2 soltanto, il che lo rende luminoso quasi quanto Sirio, ma pur sempre diciassette volte meno di Venere quando questa è al suo massimo splendore.

La vicinanza di Mercurio al sole fa sì che esso sia visibile solo vicino all'orizzonte e quando il cielo è rischiarato dal tramonto o dall'alba. Pertanto, nonostante la sua luminosità, il pianeta è difficile da osservarsi. Si è sostenuto che Copernico stesso non sia mai riuscito a vederlo.

Il fatto che Venere e Mercurio si trovino sempre nelle vicinanze del sole, e oscillino da una parte all'altra di quest'ultimo, indusse naturalmente qualcuno a supporre che i due pianeti girassero intorno al sole e non alla terra. Quest'idea venne avanzata per la prima volta dall'astronomo greco Eraclide verso il 350 avanti Cristo, ma non fu accettata fino a quando Copernico non la ripropose, diciannove secoli più tardi, non solo per Mercurio e Venere, ma per tutti i pianeti.

Se Copernico aveva ragione, e Venere era un corpo opaco che brillava di luce solare riflessa (come la luna), allora, osservata dalla terra, Venere avrebbe dovuto presentare delle fasi, proprio come la luna.

L'11 dicembre 1610 Galileo, osservando Venere al telescopio, vide che la sua sfera era illuminata solo in parte. Ripetendo le osservazioni a intervalli regolari di tempo, Galileo trovò che Venere mostrava le fasi, come la luna. Questo fu praticamente il colpo di grazia per la vecchia concezione geocentrica del sistema planetario, che non era in grado di spiegare le fasi di Venere, benché queste fossero state effettivamente osservate. Infine, anche per Mercurio vennero osservate le fasi.

L'osservazione di Venere e di Mercurio al telescopio era difficoltosa. Mercurio è così vicino al sole, così piccolo e distante, che ben poco si poteva desumere dal moto di qualche tratto riconoscibile sulla sua superficie. L'astronomo italiano Giovanni Virginio Schiaparelli, tuttavia, studiò tali tratti a intervalli regolari con grande attenzione, e, sulla base del loro mutamento nel tempo, nel 1889 annunciò che Mercurio ruotava sul proprio asse in 88 giorni.

La cosa sembrava ragionevole, dal momento che Mercurio compiva anche la sua rivoluzione intorno al sole in 88 giorni; essendo abbastanza vicino al sole da avere con esso, come si dice, un forte accoppiamento gravitazionale (come accade alla luna con la terra), poteva avere uguale periodo di rotazione e di rivoluzione.

Venere, pur essendo più grande di Mercurio e più vicina alla terra, era ancora più difficile da studiare, perché era permanentemente oscurata da uno spesso e ininterrotto strato di nubi e si presentava all'occhio degli osservatori come una distesa bianca indifferenziata.

Nessuno conosceva il suo periodo di rotazione, ma alcuni pensavano che anche Venere potesse essere in forte accoppiamento gravitazionale con il sole, e avere un periodo di rotazione uguale al periodo di rivoluzione di 224,7 giorni.

La situazione mutò radicalmente con lo sviluppo delle tecniche di impiego del radar. Come è noto, il radar si basa sull'emissione di fasci di microonde, che possono essere riflesse dagli oggetti, e sul successivo rilevamento di tali fasci riflessi. Durante la seconda guerra mondiale, i radar erano stati usati per rivelare la presenza di aerei; ma anche i corpi celesti potevano rinviare i fasci di microonde.

Nel 1946, per esempio, uno scienziato ungherese, Zoltan Lajos Bay, fece riflettere sulla luna un fascio di microonde e ne ricevette l'eco.

La luna però costituiva un bersaglio relativamente facile. Nel 1961 tre distinti gruppi americani, un gruppo inglese e un altro russo riuscirono a inviare fasci di microonde fino a Venere, captandone il riflesso. Questi fasci viaggiavano alla velocità della luce, che a quell'epoca era ormai nota con grande precisione. In base al tempo impiegato dal fascio per raggiungere Venere e tornare indietro era possibile calcolare la distanza di Venere in quel momento con precisione maggiore di quanto non fosse stato possibile in precedenza.

Determinato tale valore, si poterono ricalcolare tutte le altre distanze nel sistema solare, dato che si conosceva con esattezza la disposizione relativa degli altri pianeti.

Vi è di più: tutti gli oggetti che hanno temperatura superiore allo zero assoluto (e nessun corpo raggiunge tale temperatura) emettono in continuazione fasci di microonde. Dalla distribuzione delle lunghezze d'onda nel fascio è possibile calcolare la temperatura del corpo emittente.

Nel 1962 furono captate delle microonde emesse dalla faccia oscura di Mercurio, cioè dalla porzione della sfera visibile che non era illuminata dal sole. Se il periodo di rotazione di Mercurio fosse stato veramente di 88 giorni, una faccia del pianeta avrebbe dovuto essere rivolta sempre verso il sole e quindi avrebbe dovuto essere molto calda, mentre la faccia opposta avrebbe dovuto essere sempre al buio e quindi molto fredda. Invece risultò, dalla natura delle microonde emesse, che la faccia oscura aveva una temperatura considerevolmente più alta di quanto ci si era aspettato, e pertanto doveva essere periodicamente illuminata dal sole.

Se un fascio di microonde viene riflesso da un corpo in rotazione, subisce determinate modificazioni a causa del movimento della superficie; la natura di tali cambiamenti permette di calcolare la velocità di rotazione della superficie stessa. Nel 1965 due ingegneri elettrotecnici americani, Rolf Buchanan Dyce e Gordon H. Pettengill, che lavoravano sulla riflessione dei fasci di microonde, scoprirono che la superficie di Mercurio ruotava più velocemente di quanto si era creduto: il pianeta ruotava sul proprio asse in 59 giorni, e quindi ogni porzione della sua superficie riceveva la luce solare per un certo intervallo di tempo.

Risultò che il valore esatto del periodo di rotazione era di 58,65 giorni - esattamente due terzi del periodo di rivoluzione (88 giorni). Anche questa situazione indica l'esistenza di un forte accoppiamento gravitazionale, benché non estremo come quello necessario per sincronizzare la rotazione e la rivoluzione.

L'ESPLORAZIONE DI VENERE PER MEZZO DI SONDE.

Venere era destinata a riservare sorprese ancora maggiori. Per le sue dimensioni quasi uguali a quelle della terra (il suo diametro è di 12111 chilometri, mentre quello della terra è di 12750), era stata spesso considerata come una «sorella gemella». Venere era più vicina al sole, ma era protetta da uno strato di nubi che poteva impedire che diventasse troppo calda. Si suppose che le nubi fossero composte di goccioline di acqua, e che pertanto Venere stessa possedesse un oceano, magari ancora più esteso di quello terrestre, e potesse quindi ospitare una ricca vita marina. Furono scritti molti racconti di fantascienza (alcuni anche dall'autore di questo libro) che parlavano di Venere come di un pianeta ricco di acqua e di vita.

Nel 1956 si ebbe il primo shock. Un'équipe di astronomi americani, guidati da Cornell H. Mayer, studiò le microonde emesse dalla faccia oscura di Venere e giunse alla conclusione che essa doveva avere una temperatura molto superiore al punto di ebollizione dell'acqua. Venere doveva essere molto calda, e per questo irraggiava in modo molto intenso.

Era una conclusione quasi incredibile. Sembrava che occorresse qualcosa di più convincente di un debole fascio di microonde per accertarsi di come stessero le cose; e dato che era stato possibile inviare un razzo nelle vicinanze della luna, appariva logico tentare anche con i pianeti.

Il 27 agosto 1962 fu lanciata dagli Stati Uniti "Mariner 2", la prima sonda diretta con successo verso Venere. Essa trasportava degli strumenti capaci di rivelare e analizzare le microonde emesse da Venere e di ritrasmettere i risultati attraverso decine di milioni di chilometri, fino alla terra.

Il 14 dicembre 1962 "Mariner 2" passò a circa 35 mila chilometri dallo strato di nubi di Venere, e non vi poterono più essere dubbi: Venere era terribilmente calda su tutta la sua superficie, vicino ai poli come all'equatore, sulla faccia buia come su quella illuminata. La temperatura della superficie è di circa 475 gradi C - più di quanto occorra per fondere lo stagno e il piombo e far bollire il mercurio.

E non fu tutto per il 1962. Le microonde sono in grado di penetrare le nubi, e quelle dirette su Venere riuscirono ad attraversarle e a raggiungere la superficie solida del pianeta, rimbalzando indietro.

Queste onde potevano «vedere» la superficie, cosa impossibile per un essere umano, la cui vista dipende dalle onde luminose. Nel 1962, in base all'alterazione del fascio riflesso, Roland L. Carpenter e Richard M. Goldstein stabilirono che Venere ruota con un periodo di circa 250 giorni terrestri. Un'analisi successiva del fisico americano Irwin Ira Shapiro dimostrò che tale periodo è di 243,09 giorni. Questa lenta rotazione non è il risultato di un accoppiamento gravitazionale con il sole, perché il periodo di rivoluzione è di 224,7 giorni.

Venere ruota sul suo asse "più lentamente" di quanto non compia la sua rivoluzione intorno al sole.

C'è di più: Venere ruota sul proprio asse nella «direzione sbagliata».

Mentre in generale la direzione di rotazione, se si immagina di osservare da un punto situato sopra al polo nord terrestre, è antioraria, Venere ruota sul suo asse in direzione oraria. Fino a oggi questa rotazione "retrograda" non ha trovato una spiegazione soddisfacente.

Tra un avvicinamento alla distanza minima dalla terra e il successivo, Venere compie esattamente cinque rotazioni (retrograde) sul suo asse; in tal modo ci mostra sempre la stessa faccia quando si trova nella posizione a noi più vicina. Parrebbe così che Venere sia in stretto accoppiamento gravitazionale con la terra, ma quest'ultima sembra di gran lunga troppo piccola per esercitare un'azione simile su Venere alla distanza che le separa.

Dopo "Mariner 2", furono lanciate altre sonde su Venere, da parte tanto degli Stati Uniti quanto dell'Unione Sovietica. Quelle sovietiche erano progettate in modo da penetrare nell'atmosfera di Venere, per poi scendere morbidamente sulla sua superficie con l'ausilio del paracadute. Le condizioni erano talmente proibitive che nessuna delle "sonde Venera" dei sovietici sopravvisse a lungo; tuttavia esse riuscirono a fornirci alcune informazioni sull'atmosfera.

In primo luogo, l'atmosfera era sorprendentemente densa, circa 90 volte più di quella della terra, ed era formata in prevalenza da anidride carbonica (gas presente nell'atmosfera terrestre solo in quantità molto piccole). L'atmosfera di Venere è formata per il 96,6 per cento di anidride carbonica e per il 3,2 per cento di azoto. (Ciononostante, per la sua elevata densità, la quantità totale di azoto che essa contiene è tre volte circa quella presente nell'atmosfera terrestre.)

Il 20 maggio 1978, gli Stati Uniti lanciarono "Pioneer Venus" che il 4 dicembre dello stesso anno giunse su Venere ed entrò in un'orbita che passava molto vicino ai suoi poli; parecchie sonde si staccarono da "Pioneer Venus" e penetrarono nell'atmosfera del pianeta, confermando e completando i dati raccolti dai sovietici.

Il principale strato di nubi di Venere ha uno spessore di circa 3 chilometri ed è situato circa 50 chilometri sopra alla superficie del pianeta. Esso è formato di acqua che contiene una certa quantità di zolfo; al di sopra dello strato principale di nubi sono stati individuati vapori corrosivi di acido solforico.

Al di sotto dello strato di nubi, fino a un'altezza di 30 chilometri dalla superficie, vi è della nebbia; ancora sotto, l'atmosfera di Venere sembra sia perfettamente limpida. L'atmosfera inferiore appare stabile, senza tempeste né cambiamenti meteorologici - nient'altro che un caldo

incredibilmente uniforme ovunque. Vi sono solo dei venti leggeri; però, in considerazione della densità dell'aria, anche un venticello avrebbe la forza di un uragano terrestre. Decisamente sarebbe difficile immaginare un mondo meno piacevole della «gemella» della terra.

Della luce solare che colpisce Venere, la maggior parte viene riflessa o viene assorbita dalle nubi, ma il 3 per cento penetra fino agli strati inferiori più limpidi e forse il 2,5 per cento raggiunge il suolo. Tenuto conto del fatto che Venere è più vicina al sole e riceve una luce più intensa, la sua superficie, nonostante lo spesso e permanente strato di nubi, riceve circa un sesto della luce che arriva sulla superficie terrestre. Venere può essere più oscura della Terra, ma se potessimo in un qualche modo sopravvivere su quel pianeta, ci vedremmo perfettamente.

In effetti una delle sonde sovietiche, dopo l'atterraggio, riuscì a fare delle riprese fotografiche della superficie di Venere; queste mostrarono rocce sparpagliate dagli spigoli aguzzi, cosa che indica che non c'è stata nel passato un'intensa azione di erosione.

Le microonde che colpiscono la superficie di Venere e ne vengono riflesse possono essere utilizzate per «vedere» la superficie stessa, analogamente a quanto accade con la luce, purché i fasci riflessi vengano rivelati e analizzati da strumenti adatti, così come le onde luminose vengono registrate dall'occhio o dalla fotografia. Le microonde, che sono molto più lunghe delle onde luminose, «vedono» in maniera più sfocata, ma sono sempre meglio che niente. "Pioneer Venus" è riuscita a fare una mappa della superficie di Venere mediante le microonde.

La maggior parte della superficie del pianeta appare del tipo che siamo soliti associare con i continenti piuttosto che con i fondali marini. Mentre la terra ha un vasto fondo marino (coperto dall'acqua), che occupa i sette decimi della superficie planetaria, Venere ha un enorme supercontinente che ricopre i cinque sesti della superficie totale, mentre il rimanente sesto è occupato da limitati avvallamenti, privi di acqua.

A quanto sembra, il supercontinente che ricopre Venere è piatto, con qualche indizio di crateri, non numerosi però. Potrebbe darsi che essi siano stati cancellati dall'azione erosiva della spessa atmosfera. Vi sono, invece, delle aree del supercontinente soprelevate, due delle quali di grandi dimensioni.

In quella che sulla terra sarebbe la regione artica, vi è, su Venere, un vasto altopiano, che è stato chiamato Terra di Ishtar: la sua estensione è circa pari a quella degli Stati Uniti. Nella zona orientale della Terra di Ishtar sorge una catena montuosa, i Monti Maxwell, con alcune vette che raggiungono un'altitudine di oltre 11700 metri sopra al livello medio all'esterno dell'altopiano. Queste vette sono decisamente più alte di qualsiasi cima di una montagna della terra.

Nella regione equatoriale di Venere c'è un altro altopiano, ancora più vasto, che è stato chiamato Terra di Afrodite, le cui sommità non raggiungono l'altezza delle vette della Terra di Ishtar.

È difficile dire se qualcuna delle montagne di Venere sia in realtà un vulcano; due di esse potrebbero essere per lo meno vulcani estinti, uno dei quali, il Monte Rhea, si estende su un'area pari alla superficie dell'Italia.

L'esplorazione di Mercurio per mezzo di sonde.

La superficie di Mercurio non presenta i problemi proposti da quella di Venere; su Mercurio non esistono né atmosfera né strati di nubi. È quindi sufficiente inviare una sonda sul pianeta.

Il 3 novembre 1973 venne lanciata "Mariner" 10. Essa passò vicino a Venere il 5 febbraio 1974, e da lì ci inviò alcuni dati molto utili; poi proseguì in direzione di Mercurio.

Il 29 marzo 1974 "Mariner 10" passò a 700 chilometri di distanza dalla superficie di Mercurio, per poi situarsi in orbita intorno al sole, in modo tale da compiere una rivoluzione in 176 giorni, pari a due volte l'anno di Mercurio. Ciò doveva farle riincontrare il pianeta nello stesso punto, dato che, per ogni rivoluzione della sonda, Mercurio ne compiva esattamente due. Il 21 settembre 1974 "Mariner 10" sfiorò una seconda volta il pianeta, e il 16 marzo 1975 effettuò un

terzo passaggio, arrivando a 326 chilometri di distanza dalla superficie di Mercurio. In seguito, avendo consumato il gas che la manteneva in un assetto di volo stabile, "Mariner 10" non fu più utilizzabile per lo studio del pianeta.

Nei suoi tre passaggi "Mariner 10" fotografò circa tre ottavi della superficie di Mercurio, mostrando un paesaggio molto simile alla superficie della luna. Vi erano ovunque crateri, il più grande dei quali con un diametro di circa 200 chilometri. Tuttavia, Mercurio aveva assai pochi «mari». La regione più ampia relativamente priva di crateri ha un diametro di circa 1400 chilometri e prende il nome di Caloris, perché si trova quasi direttamente sotto al sole allorché Mercurio è al perielio, cioè nel punto della sua orbita più vicino al sole.

Mercurio possiede anche grandi scogliere, lunghe più di 160 chilometri e alte circa due chilometri e mezzo.

MARTE.

Marte è il quarto pianeta in ordine di distanza dal sole, quello che segue immediatamente la terra. La sua distanza media dal sole è di 228 milioni di chilometri. Quando la terra e Marte si trovano dalla stessa parte rispetto al sole, i due pianeti possono avvicinarsi tra loro a una distanza media di 80 milioni di chilometri. Dato che l'orbita di Marte è un'ellisse alquanto schiacciata, in certi casi Marte e la terra sono separati da soli 56 milioni di chilometri. Questi avvicinamenti avvengono ogni trentadue anni.

Mentre il sole e la luna mutano di posizione in modo più o meno costante, muovendosi da ovest a est sullo sfondo delle stelle, i pianeti hanno un moto più complicato. Normalmente essi si muovono da ovest verso est rispetto alle stelle, di notte in notte. In certi momenti, però, il loro moto rallenta, fino ad arrestarsi del tutto; a questo punto il pianeta in questione comincia a muoversi «all'indietro», da est verso ovest. Questo moto retrogrado non è mai ampio quanto quello ordinario, così che il moto generale di ogni pianeta è da ovest verso est, ed esso finisce per compiere un giro completo nel cielo. Nel caso di Marte, il moto retrogrado è particolarmente ampio ed evidente.

Perché accade tutto ciò? La concezione degli antichi di un sistema planetario con la terra al centro incontrava gravi difficoltà a spiegare il moto retrogrado; il sistema copernicano, con il sole al centro, ci riusciva invece facilmente. La terra, muovendosi su un'orbita più prossima al sole di quella di Marte, per compiere una rivoluzione completa deve percorrere una minore distanza. Quando la terra e Marte si trovano dalla stessa parte del sole, la terra supera Marte, che perciò appare dotato di moto retrogrado. Un raffronto tra il moto orbitale della terra e quello di ognuno degli altri pianeti riesce a spiegare tutti questi apparenti moti retrogradi - un punto molto importante a favore del sistema planetario eliocentrico. Marte, essendo più lontano della terra dal sole, riceve meno luce. È un pianeta piccolo, con un diametro di soli 6790 chilometri (poco più della metà di quello della terra) e ha un'atmosfera molto rarefatta, così che riflette una piccola parte della luce che riceve. Ha però un vantaggio in confronto a Venere. Quando Venere è nella posizione più vicina a noi, si trova tra noi e il sole, e ne vediamo solo il lato scuro. Marte, invece, quando ci è più vicino, si trova all'esterno, essendo più lontano dal sole, così che noi ne vediamo la parte illuminata (una sorta di «Marte pieno»), il che ne aumenta la luminosità. Nel momento di massima luminosità, Marte ha una magnitudine di meno 2,8, cosa che ne fa l'oggetto più splendente di tutti quelli che vediamo nel cielo, salvo il sole, la luna e Venere.

Tuttavia questa luminosità viene raggiunta soltanto ogni trentadue anni, quando Marte è particolarmente vicino a noi. Quando invece esso si trova nella parte della sua orbita opposta alla terra rispetto al sole, la sua distanza da noi diventa tanto grande da renderlo non più luminoso di qualsiasi stella normalmente brillante.

Dal 1580 in poi l'astronomo danese Tycho Brahe compì delle attente osservazioni di Marte (senza telescopio, dato che questo non era ancora stato inventato) per studiarne il moto e fare predizioni più precise delle sue posizioni future. Dopo la morte di Tycho, il suo assistente,

l'astronomo tedesco Giovanni Keplero, usò quelle osservazioni per ricavarne l'orbita di Marte, giungendo alla conclusione che era necessario abbandonare l'idea delle orbite circolari, idea a cui si erano attenuti per duemila anni gli astronomi; nel 1609 Keplero dimostrò che i pianeti dovevano muoversi su orbite ellittiche. La concezione del sistema planetario elaborata da Keplero è ancor oggi valida, e lo sarà indubbiamente, nella sua sostanza, anche in futuro.

Un altro contributo fondamentale alla nostra conoscenza del sistema solare venne dallo studio di Marte nel 1673 (come già ho accennato), allorché Cassini determinò la parallasse del pianeta e per la prima volta si fece un'idea delle distanze reali dei vari pianeti.

Grazie al telescopio, Marte divenne qualcosa di più di un punto luminoso. Christiaan Huyghens, nel 1659, osservò un segno scuro triangolare cui diede il nome di Syrtis Major (che significa «grande palude»). Seguendo il moto di questo segno, poté dimostrare che Marte ruotava sul suo asse in 24 ore e mezzo circa. (Oggi il periodo accertato è di 24,623 ore.)

Marte, essendo più lontano della terra dal sole, ha un'orbita più ampia e viaggia più lentamente sotto l'azione gravitazionale del sole. Per compiere una rivoluzione, impiega 687 giorni terrestri (1,88 anni terrestri), pari a 668,61 giorni marziani.

Marte è l'unico pianeta noto che abbia un periodo di rotazione prossimo a quello della terra. Non solo: nel 1781, William Herschel dimostrò che l'asse di Marte era inclinato in modo molto simile all'asse terrestre. Quest'ultimo ha un'inclinazione di 23,45 gradi rispetto alla verticale, così che nell'emisfero settentrionale si hanno la primavera e l'estate quando il polo nord è inclinato verso il sole, mentre si hanno l'autunno e l'inverno quando il polo nord è orientato dalla parte opposta; nell'emisfero meridionale, invece, le stagioni sono invertite, perché il polo sud è orientato verso il sole quando il polo nord è orientato in senso opposto.

L'asse di Marte è inclinato di 25,17 gradi rispetto alla verticale, come poté affermare Herschel osservando accuratamente la direzione in cui si muovevano le macchie rilevate su Marte, al ruotare del pianeta. Pertanto Marte ha delle stagioni, proprio come accade da noi, solo che ciascuna di esse dura il doppio di una stagione terrestre, ed è, ovviamente, più fredda.

Un'altra somiglianza venne scoperta nel 1784, quando Herschel notò che Marte ha delle calotte di ghiaccio al polo nord e al polo sud. Nel complesso, Marte assomiglia alla terra più di qualsiasi altro mondo da noi mai osservato in cielo. A differenza della luna e di Mercurio, Marte ha un'atmosfera (osservata per la prima volta da Herschel), però non così densa e carica di nubi come quella di Venere.

Ma la somiglianza tra Marte e la terra non si estende ai satelliti. La terra ha un grande satellite, la luna, mentre Mercurio e Venere non ne hanno, e neppure Marte, in un primo tempo, sembrava averne; o quanto meno, più di duecentocinquanta anni di osservazioni al telescopio non ne avevano rivelato alcuno.

Tuttavia, nel 1877, mentre Marte stava per giungere alla distanza minima dalla terra, l'astronomo americano Asaph Hall decise di mettersi alla ricerca di eventuali satelliti nelle vicinanze del pianeta. Egli infatti pensava che, dal momento che fino ad allora non se ne erano trovati, essi dovessero, se mai, essere molto piccoli e molto vicini a Marte, così da restare probabilmente oscurati dalla luce del pianeta.

La ricerca si protrasse per molte notti, ma l'11 agosto 1877 Hall decise di rinunciarvi. Sua moglie, Angelina Stickney Hall, lo spinse a compiere un ultimo tentativo, e fu proprio in quella notte in più passata al telescopio che egli scoprì effettivamente due minuscoli satelliti prossimi a Marte, ai quali diede i nomi di Phobos e Deimos, i figli di Marte secondo la mitologia. (I due nomi significano rispettivamente «paura» e «terrore», termini appropriati per i figli del dio della guerra.)

Phobos, il satellite più interno, dista soltanto 9350 chilometri dal centro di Marte e, quindi, 5950 dalla sua superficie. Esso compie un giro sulla sua piccola orbita in 7,65 ore - cioè meno di un terzo del tempo impiegato da Marte per ruotare sul proprio asse, così che Phobos, nella sua corsa, precede di continuo la superficie marziana; pertanto, osservato da Marte, Phobos sorge a occidente

e tramonta a oriente. Deimos, il satellite più distante, è a 23500 chilometri dal centro di Marte e compie una rivoluzione intorno al pianeta in 30,3 ore.

Poiché i due satelliti erano così piccoli che apparivano solo come punti luminosi anche con i migliori telescopi, per un secolo dopo la loro scoperta non si seppe nulla di loro, tranne le loro distanze da Marte e i periodi di rivoluzione. Dalla distanza e dal moto dei satelliti, era facile calcolare l'intensità del campo gravitazionale di Marte e quindi la sua massa; risultò che questa era quasi esattamente un decimo di quella della terra, e che la sua gravità alla superficie era esattamente tre ottavi di quella della terra. Una persona di 70 chilogrammi (sulla terra) ne peserebbe 26,25 su Marte. Marte, relativamente piccolo come pianeta, è comunque decisamente più grande della luna. La sua massa è 8,7 volte quella lunare, e la sua gravità superficiale 2,25 volte quella della luna. Sotto questi aspetti, Marte è approssimativamente in una situazione intermedia tra la luna e la terra. (Venere e Mercurio, non avendo satelliti, non offrivano questa semplice possibilità di calcolo della loro massa; oggi però sappiamo che la massa di Venere è quattro quinti di quella della terra, mentre quella di Mercurio un diciottesimo. Mercurio, con una massa pari a circa la metà di quella di Marte, è quindi il più piccolo degli otto pianeti principali.)

Se si conoscono le dimensioni e la massa di un corpo celeste, se ne può facilmente calcolare la densità. Mercurio, Venere e la terra hanno tutti densità che sono più di cinque volte quella dell'acqua: rispettivamente 5,48, 5,25 e 5,52. Si tratta di valori superiori a quelli che ci si sarebbe potuto aspettare se questi mondi fossero costituiti di roccia omogenea; pertanto si pensa che essi abbiano un nucleo metallico. (Ritorneremo su questo punto più ampiamente nel prossimo capitolo.)

La luna ha una densità che è 3,34 volte quella dell'acqua, e probabilmente è costituita solo di materiale roccioso. Marte rappresenta una via di mezzo: la sua densità è 3,93 volte quella dell'acqua, e potrebbe avere un nucleo metallico molto piccolo.

MAPPE DI MARTE.

Era naturale che gli astronomi cercassero di tracciare delle mappe di Marte, disegnando le configurazioni chiare e scure formate dalle macchie sulla sua superficie. Questo compito era facile per la luna, ma Marte, anche quando si trova più vicino a noi, è 150 volte più distante della luna, e inoltre ha un'atmosfera che, pur essendo sottile, lo vela, cosa che non accade per la luna.

Nel 1830, tuttavia, un astronomo tedesco, Wilhelm Beer, che aveva tracciato una mappa particolareggiata della luna, rivolse la sua attenzione a Marte, e disegnò la prima mappa di quel pianeta, che ne metteva in risalto l'alternarsi delle zone di luce e di ombra. Egli avanzò l'ipotesi che le zone scure fossero acqua e quelle chiare terra. Il guaio fu che altri astronomi cercarono a loro volta di realizzare delle mappe, e ciascuno di loro propose una mappa diversa.

Tra coloro che si misurarono nella realizzazione di mappe di Marte, chi ebbe il maggior successo fu Schiaparelli (che più tardi avrebbe erroneamente stabilito che la rotazione di Mercurio avveniva in 88 giorni). Nel 1877, durante la fase di massimo avvicinamento di Marte che permise a Hall di scoprirne i due satelliti, Schiaparelli disegnò una mappa di Marte che appariva del tutto diversa da qualsiasi altra tracciata precedentemente. Tuttavia, questa volta gli astronomi furono d'accordo. C'era stato un continuo progresso nei telescopi, e ora tutti vedevano più o meno ciò che vedeva Schiaparelli; la nuova mappa di Marte rimase valida per quasi un secolo. Alle varie regioni di Marte, Schiaparelli assegnò nomi tratti dalla mitologia e dalla geografia antica della Grecia, di Roma e dell'Egitto.

Osservando Marte, Schiaparelli notò l'esistenza di sottili linee scure che collegavano ampie aree scure, così come gli stretti o i canali collegano due mari. Egli chiamò queste linee "canali"; in inglese il termine venne impropriamente tradotto con "canals" anziché con "channels", generando equivoci, perché mentre il secondo termine in inglese è usato per indicare un fenomeno naturale, il primo indica il prodotto di un intervento umano.

Le osservazioni di Schiaparelli suscitarono immediatamente un nuovo interesse per Marte. Da tempo si riteneva che il pianeta fosse molto simile alla terra; essendo però più piccolo e dotato di un campo gravitazionale più debole, Marte forse non era in grado di trattenere gran parte della sua atmosfera o della sua acqua, e quindi doveva essersi prosciugato nel corso di molti milioni di anni. Qualsiasi forma di vita intelligente che si fosse eventualmente evoluta su Marte doveva aver sostenuto una dura lotta per sopravvivere alla siccità.

La gente cominciò così a credere che non soltanto vi fosse su Marte vita intelligente, ma che questa potesse essere in possesso di una tecnologia più avanzata della nostra. I marziani potevano aver costruito i canali per trasportare l'acqua dalle calotte polari fino alle zone agricole delle regioni equatoriali, dal clima più mite.

Altri astronomi cominciarono a studiare i canali; tra questi il più entusiasta fu l'americano Percival Lowell, il quale, essendo molto ricco, aprì un osservatorio privato nell'Arizona, nel 1894. Là, nell'aria pulita dell'altopiano desertico, lontano dalle luci della città, la visibilità era eccellente, e Lowell cominciò a disegnare mappe ancora più dettagliate di quelle di Schiaparelli. Alla fine aveva disegnato più di 500 canali e scritto libri divulgativi sulla possibilità che ci fosse vita su Marte.

Nel 1897, lo scrittore inglese di fantascienza Herbert George Wells pubblicò un romanzo a puntate, "La guerra dei mondi", in una rivista a grande diffusione, dando ancora maggior pubblicità a questa idea. Un gran numero di persone arrivò a considerare come accertata la presenza di vita su Marte; e il 30 ottobre 1938 Orson Welles mandò in onda una riduzione radiofonica di "La guerra dei mondi", in cui si faceva credere che i marziani fossero atterrati nel New Jersey, con tanto realismo da suscitare il panico di moltissima gente, che aveva scambiato la finzione drammatica per un fatto reale.

Vi furono tuttavia molti astronomi che negarono la realtà dei canali di Lowell, che non riuscivano a osservare; Maunder (colui che aveva descritto per primo i minimi di Maunder, cioè i periodi di assenza delle macchie solari) riteneva che i canali di Lowell fossero illusioni ottiche. Nel 1913, scarabocchiò delle macchie irregolari all'interno di cerchi e poi collocò degli scolari a una distanza dai cerchi tale da rendere difficile scorgere con precisione ciò che essi contenevano. Chiese poi ai bambini di disegnare quello che avevano visto, ed essi tracciarono delle linee rette molto simili ai canali di Lowell.

L'osservazione diretta, inoltre, sembrava ridimensionare la somiglianza tra Marte e la terra. Nel 1926 due astronomi americani, William Weber Coblentz e Carl Otto Lampland, riuscirono a misurare la temperatura sulla superficie di Marte e trovarono che era inferiore a quella che si credeva. Qualche indizio faceva pensare che durante il giorno, nel periodo in cui Marte si trovava al perielio (cioè nel punto più vicino al sole), il clima all'equatore potesse essere abbastanza temperato, ma la notte marziana appariva dovunque tanto fredda quanto quella antartica invernale. La differenza tra temperatura diurna e temperatura notturna faceva pensare che l'atmosfera di Marte potesse essere più sottile di quanto non si fosse fino ad allora creduto.

Nel 1947 l'astronomo olandese-americano Gerard P. Kuiper analizzò la porzione infrarossa della luce proveniente da Marte e concluse che l'atmosfera marziana era formata prevalentemente da anidride carbonica. Non riuscì a trovare traccia alcuna di azoto, ossigeno o vapor acqueo. Le probabilità che vi fossero forme di vita complesse paragonabili a quelle terrestri sembravano molto scarse. Nonostante tutto ciò, è ostinatamente sopravvissuta l'imbarazzante credenza nella vegetazione di Marte e perfino nei suoi canali.

L'ESPLORAZIONE DI MARTE PER MEZZO DI SONDE.

Quando i razzi cominciarono a salire nell'atmosfera terrestre e oltre, anche le speranze di risolvere l'annoso problema si riaccesero. La prima sonda diretta con successo verso Marte, "Mariner 4", venne lanciata il 28 novembre 1964. Il 14 luglio 1965 essa passò a 9600 chilometri dalla superficie del pianeta, scattando una serie di 20 fotografie, che furono trasformate in segnali

radio subito rinviati sulla terra, dove vennero nuovamente convertiti in fotografie. Queste mostravano solamente crateri, senza nessuna traccia di canali.

Nel passare dietro a Marte "Mariner 4" inviò dei segnali radio che, prima di scomparire, attraversarono l'atmosfera marziana; da essi si dedusse che quest'ultima è ancor più sottile di quanto non si fosse supposto: la sua densità è meno di un centesimo di quella della terra. "Mariner 6" e "Mariner 7", sonde più sofisticate dirette verso Marte, vennero lanciate rispettivamente il 24 febbraio e il 27 marzo 1969.

Esse si avvicinarono fino a 3200 chilometri dalla superficie del pianeta, inviando complessivamente 200 fotografie; vennero riprese ampie porzioni della superficie di Marte, e risultò che, mentre alcune regioni erano disseminate di crateri come la luna, altre erano relativamente prive di caratteristiche salienti, e altre ancora avevano un aspetto caotico e confuso. Sembra dunque che Marte sia caratterizzato da un'evoluzione geologica complessa.

Tuttavia, non vi era alcuna traccia di canali, l'atmosfera era composta almeno per il 95 per cento di anidride carbonica e la temperatura era ancora inferiore al valore indicato dalle misurazioni di Coblentz e Lampland. Qualunque speranza che vi fosse vita intelligente su Marte o comunque qualsiasi tipo di vita complessa - sembrava caduta.

Rimaneva però ancora molto da fare. La successiva sonda inviata su Marte fu "Mariner 9", che venne lanciata il 30 maggio 1971, e raggiunse il pianeta il 13 novembre di quello stesso anno; la sonda, però, invece di oltrepassarlo, entrò in orbita intorno a esso. Fu una fortuna, perché, durante il suo viaggio verso Marte, si era sollevata una tempesta di polvere su tutto il pianeta e, per molti mesi, non sarebbe stato possibile scattare fotografie nitide. In orbita, invece, la sonda poté attendere che la tempesta di sabbia fosse passata; in dicembre l'atmosfera di Marte si schiarì, e la sonda si mise al lavoro.

Essa fece una mappa completa di Marte altrettanto chiara di quelle della luna; e, dopo un secolo, il mistero dei canali venne risolto una volta per tutte. I canali non esistono. Quelli che erano stati «visti», erano, come aveva insistentemente sostenuto Maunder, l'effetto di illusioni ottiche. Tutto era asciutto, e le zone oscure erano semplicemente cumuli più scuri di particelle di polvere, come l'astronomo americano Carl Sagan aveva suggerito un paio di anni prima.

Metà del pianeta, soprattutto nell'emisfero meridionale, era cosparsa di crateri come la luna. L'altra metà sembrava aver subìto un'azione vulcanica che aveva cancellato i suoi crateri; in effetti furono individuate alcune grandi montagne che erano evidentemente vulcani (anche se forse inattivi da tempo). La più grande di tutte fu chiamata, nel 1973, Monte Olimpo; essa raggiunge un'altitudine di 24 mila metri sul livello medio del suolo, e il suo grande cratere centrale ha un diametro di 64 chilometri. È dunque molto più grande di qualsiasi vulcano esistente sulla terra.

C'era però, sulla superficie marziana, qualcosa che poteva aver dato l'illusione di essere un canale. Si trattava di un grande canyon, oggi denominato Valles Marineris, lungo circa 3000 chilometri, largo fino a 500 e profondo 2. Esso è lungo nove volte il Grand Canyon, largo 14 volte tanto e profondo il doppio. Potrebbe esser stato prodotto da un'azione vulcanica avvenuta circa 200 milioni di anni fa.

Sulla superficie di Marte vi sono anche dei solchi sinuosi, che presentano degli affluenti e assomigliano molto a letti prosciugati di fiumi. Potrebbe forse darsi che Marte stia attraversando attualmente un'era glaciale, in cui l'acqua sia totalmente congelata nelle calotte e nel sottosuolo? C'è forse stato un tempo, in un passato ragionevolmente recente, in cui le condizioni erano migliori, l'acqua abbondante sotto forma liquida e i fiumi attivi sul suolo marziano? In tal caso (e in attesa che in un futuro ragionevolmente vicino tali condizioni si ripresentino), esistono forse delle semplicissime forme di vita che riescono a sopravvivere in modo precario su Marte?

Ciò che occorreva per chiarire la questione era un atterraggio morbido su Marte. Vennero lanciati "Viking 1" e "Viking 2" rispettivamente il 20 agosto e il 9 settembre 1975; "Viking 1" entrò in orbita intorno a Marte il 19 giugno 1976 e inviò un modulo di atterraggio, che si posò con

successo sulla superficie marziana il 20 luglio. Alcune settimane dopo, anche da "Viking 2" si staccò un modulo che atterrò in un punto più a nord.

Durante l'attraversamento dell'atmosfera di Marte, le analisi fatte dalle apparecchiature di bordo rivelarono la presenza, accanto all'anidride carbonica, del 2,7 per cento di azoto e dell'1,6 per cento di argo. Vi era poi una modestissima traccia d'ossigeno.

Sulla superficie, venne rilevata una temperatura diurna massima di meno 29 gradi C. Sembrava che non vi fosse alcuna probabilità che la temperatura superficiale raggiungesse in qualche zona di Marte il punto di fusione del ghiaccio, il che significava nessuna possibilità di acqua allo stato liquido. C'era troppo freddo per la vita, proprio come su Venere c'era troppo caldo. O, per lo meno, vi era troppo freddo per qualsiasi forma di vita, salvo quelle più semplici. C'era talmente freddo che perfino l'anidride carbonica congelava nelle regioni più fredde; sembrava infatti che le calotte di ghiaccio fossero costituite, almeno in parte, da anidride carbonica congelata.

I moduli inviarono delle fotografie della superficie marziana e analizzarono il suolo. Risultò che esso è più ricco di ferro e più povero di alluminio del suolo terrestre; circa l'80 per cento del suolo marziano è costituito da un'argilla ricca di ferro; il ferro presente potrebbe essere sotto forma di limonite, un composto responsabile del colore rosso dei mattoni. Il colore rossastro di Marte, che aveva suscitato le paure dei primi esseri umani per l'associazione con il sangue, non ha nulla a che fare con esso: semplicemente, Marte è un mondo rugginoso.

Cosa più importante, i moduli di atterraggio erano muniti di piccoli laboratori chimici in grado di sottoporre il suolo a controlli volti a verificare se esso reagisce in modo da far pensare alla presenza di cellule viventi. Vennero effettuati tre diversi esperimenti, senza ottenere in nessuno dei tre risultati conclusivi. Sembrò possibile l'esistenza della vita, ma non fu raggiunta una vera certezza. Ciò che rese perplessi gli scienziati fu il fatto che l'analisi del suolo mostrava che non vi erano quantità apprezzabili di composti organici - cioè il tipo di composti associati alla vita. Gli scienziati non erano affatto disposti a credere alla possibilità di una vita non organica e così il problema resterà in attesa di una soluzione fino al momento in cui si potranno far scendere sul pianeta strumenti più sofisticati, o fino a quando, ancora meglio, potranno raggiungerlo degli esseri umani.

I SATELLITI DI MARTE.

In origine, le sonde inviate verso Marte non erano state progettate per effettuare studi dettagliati dei piccoli satelliti del pianeta; ma quando "Mariner 9" si trovò in orbita intorno a Marte senza la possibilità di scattare fotografie a causa della tempesta di sabbia, le sue apparecchiature di ripresa vennero puntate sui satelliti. Le fotografie mostrarono che essi avevano un contorno irregolare. (Solitamente si pensa agli oggetti astronomici come a delle sfere; ma essi sono effettivamente sferici solo se sono abbastanza grandi da avere campi gravitazionali sufficientemente intensi da smussare tutte le irregolarità di grandi dimensioni.) In effetti, la forma dei due satelliti appariva molto simile a quella di una patata secca, e la somiglianza era accentuata dai crateri che ricordavano stranamente gli «occhi» delle patate.

Il diametro di Phobos, il maggiore dei due, variava da 19 a 27 chilometri, e quello di Deimos da 10 a 16. Non erano che enormi massi in orbita intorno a Marte, con l'asse più lungo costantemente diretto verso il centro del pianeta, così che ciascuno dei due satelliti risultava in stretto accoppiamento gravitazionale con Marte, come la luna lo è con la terra.

I due crateri più grandi di Phobos sono stati chiamati Hall e Stickney in onore del loro scopritore e di sua moglie, che lo aveva incitato a insistere nella ricerca. I due crateri maggiori di Deimos sono stati chiamati Voltaire e Swift: i due grandi scrittori satirici, l'uno francese e l'altro inglese, avevano infatti immaginato nelle loro opere che Marte avesse due satelliti.

GIOVE.

Giove, il quinto pianeta a partire dal sole, è il gigante del sistema planetario; il suo diametro misura 142 mila 700 chilometri, 11,2 volte quello della terra; la sua massa è 318,4 volte quella terrestre. In effetti, la sua massa da sola è più del doppio della somma delle masse di tutti gli altri pianeti. Nonostante ciò, esso resta un pigmeo al cospetto del sole, che ha una massa 1040 volte maggiore.

La distanza media di Giove dal sole è di 778 milioni di chilometri, cioè 5,2 volte la distanza della terra dal sole. Giove non si avvicina mai a meno di 630 milioni di chilometri dalla terra, anche quando si trova dalla stessa parte del nostro pianeta rispetto al sole; la luce solare ricevuta da Giove è ventisette volte meno intensa di quella che riceviamo noi. Eppure, date le sue enormi dimensioni, esso brilla con grande risalto nel nostro cielo.

La sua magnitudine, al massimo dello splendore, è meno 2,5: Giove è dunque considerevolmente più luminoso di qualsiasi stella. Nelle stesse condizioni, Venere e Marte superano lo splendore di Giove (e Venere di molto); d'altra parte, i due pianeti sono spesso molto meno luminosi, allorché si trovano nel tratto più distante della loro orbita. Invece Giove perde ben poco della sua luminosità quando si allontana dalla terra, perché la sua orbita è talmente lontana che non fa grande differenza se esso si trovi dalla nostra parte, rispetto al sole, o dalla parte opposta. Insomma, Giove è spesso l'oggetto più luminoso del cielo, eccezion fatta per il sole e per la luna (soprattutto dato che esso può splendere in cielo per tutta la notte, cosa che Venere non può fare mai); è dunque giusto che esso porti il nome del re degli dei della mitologia greco-romana.

I SATELLITI DI GIOVE.

Quando Galileo costruì il suo primo telescopio e lo rivolse verso il cielo, non poteva certo trascurare Giove. Il 7 gennaio 1610 osservò questo pianeta e notò quasi subito tre punti luminosi nelle sue vicinanze - due da una parte e uno dall'altra, tutti allineati. Notte dopo notte Galileo tornò a osservare Giove, e sempre i tre piccoli corpi erano visibili, pur mutando posizione, ora da una parte ora dall'altra del pianeta. Il 13 gennaio egli osservò un quarto oggetto.

Galileo giunse alla conclusione che i quattro piccoli corpi giravano intorno a Giove, come fa la luna con la terra. Questi furono i primi oggetti del sistema solare, invisibili a occhio nudo, a essere scoperti con il telescopio; e fornirono, inoltre, una prova visibile dell'esistenza di qualche corpo nel sistema solare che non girava intorno alla terra.

Per questi quattro oggetti Keplero coniò il termine "satellite", da una parola latina che indica persona al servizio di un uomo ricco o potente. Da allora, tutti gli oggetti che girano intorno a un pianeta sono stati chiamati con questo nome: la luna è il satellite della terra, e lo "Sputnik 1" era un satellite artificiale.

I quattro satelliti di Giove scoperti nel 1610 sono indicati complessivamente come "satelliti galileiani". Poco dopo la scoperta di Galileo, un astronomo tedesco, Simone Marius (Simon Mayr), diede un nome a ciascuno di essi. Procedendo da Giove verso l'esterno, sono: Io, Europa, Ganimede e Callisto, tutti nomi di personaggi associati nei miti a Giove (Zeus per i greci).

Io, il più vicino tra i satelliti galileiani, dista 421500 chilometri dal centro di Giove, approssimativamente quanto la luna dista dal centro della terra; tuttavia Io impiega 1,77 giorni per compiere una rivoluzione completa intorno a Giove, a fronte dei 27,32 giorni che la luna impiega per girare intorno alla terra. La ragione di questa velocità tanto maggiore di Io sta nell'intensa attrazione gravitazionale esercitata da Giove, molto maggiore di quella esercitata dalla terra sulla luna, come è logico data la massa molto maggiore di Giove. (Anzi, è proprio la velocità di Io a permettere di calcolare la massa di Giove.)

Europa, Ganimede e Callisto distano da Giove rispettivamente 670500, 1070000 e 1881000 chilometri e girano intorno ad esso in 3,55, 7,16 e 16,69 giorni. Giove e i suoi quattro satelliti

galileiani sono come un sistema solare in miniatura e la loro scoperta rese molto più credibile il modello copernicano.

Quando i satelliti consentirono di determinare la massa di Giove, la grande sorpresa fu che essa fosse tanto modesta: 318,4 volte quella della terra, mentre il volume del pianeta era 1400 volte maggiore del volume della terra. Perché dunque Giove, occupando 1400 volte lo spazio occupato dalla terra, non possiede anche 1400 volte più materia della terra, e quindi una massa 1400 volte maggiore? La risposta è che ogni parte di Giove ha una massa inferiore a quella di una parte equivalente della terra, cioè che Giove ha una densità minore.

La densità di Giove è in effetti solo 1,34 volte quella dell'acqua, cioè meno di un quarto di quella della terra. Evidentemente Giove deve essere costituito di materiale meno denso delle rocce e dei metalli.

Anche i satelliti possono essere confrontati con la luna. Europa, il più piccolo dei quattro, ha circa 3100 chilometri di diametro, poco meno della luna. Io, con il suo diametro di 3650 chilometri, ha circa la stessa grandezza del nostro satellite. Callisto e Ganimede sono entrambi più grandi della luna: Callisto ha un diametro di 4850 chilometri e Ganimede di 5150.

Ganimede è in effetti il satellite più grande che si conosca nel sistema solare, e ha una massa che è 2,5 volte quella della luna; esso è decisamente più grande del pianeta Mercurio, che ha press'a poco le dimensioni di Callisto. Mercurio, però, è fatto di materiali più densi di quelli che costituiscono Ganimede, così che quest'ultimo, con il suo volume maggiore, ha solo i tre quinti circa della massa di Mercurio. Io ed Europa, i due satelliti più interni, hanno circa la stessa densità della luna e devono essere costituiti di materiale roccioso; Ganimede e Callisto hanno densità molto simili a quella di Giove e devono essere formati da materiali più leggeri.

Non sorprende il fatto che Giove abbia quattro grandi satelliti mentre la terra ne ha soltanto uno, se si considerano le rispettive dimensioni dei due pianeti. In realtà, se qualcosa deve sorprenderci, è piuttosto che Giove non ne abbia di più, o la terra di meno.

I quattro satelliti galileiani presi assieme hanno 6,2 volte la massa della luna, ma solo 1 su 4200 della massa di Giove, il pianeta intorno a cui ruotano. La luna ha, da sola, 1 su 81 della massa della terra.

I pianeti in genere hanno satelliti di dimensioni molto ridotte in confronto alle proprie - come nel caso di Giove. Tra i pianeti più piccoli, Venere e Mercurio non hanno affatto satelliti (anche se Venere è grande quasi come la terra), mentre Marte ne ha due, ma piccolissimi. Il satellite della terra è così grande che i due corpi insieme potrebbero quasi essere considerati un pianeta doppio (fino a non molto tempo fa, si pensava che la terra fosse unica sotto questo aspetto - ma ci si sbagliava, come vedremo più avanti in questo capitolo).

Per quasi tre secoli dopo la scoperta di Galileo non si identificarono altri satelliti di Giove, anche se, nello stesso periodo, si scoprirono quindici satelliti di altri pianeti.

Infine, nel 1892, l'astronomo americano Edward Emerson Barnard riuscì a scorgere una macchiolina luminosa vicino a Giove, così fioca che era quasi impossibile vederla a cospetto dello splendore del pianeta. Era un quinto satellite, l'ultimo a essere scoperto visualmente; in seguito, i satelliti sarebbero stati scoperti esaminando le fotografie scattate dalla terra o da una sonda.

Al quinto satellite venne dato il nome di Amaltea (dal nome di una ninfa che, secondo il mito, aveva allevato Giove). Solo negli anni settanta del nostro secolo la denominazione è divenuta ufficiale. Amaltea dista solo 180 mila chilometri dal centro di Giove e compie una rivoluzione in 11,95 ore; è più vicino di tutti i satelliti galileiani una delle ragioni per cui fu scoperto così tardi: a quella distanza la luce di Giove lo rende quasi invisibile. Un'altra ragione è che il suo diametro è soltanto di circa 250 chilometri, un tredicesimo di quello della più piccola tra le lune galileiane.

Si è poi scoperto, però, che Giove ha molti altri satelliti, ancora più piccoli di Amaltea e perciò ancora meno luminosi. Essi sono situati molto all'esterno dell'orbita dei satelliti galileiani. Nel ventesimo secolo vennero scoperti otto di questi "satelliti esterni": il primo nel 1904 e l'ottavo

nel 1974. Al momento della scoperta furono contrassegnati solo da numeri romani crescenti, da Giove Sesto a Giove Tredicesimo.

L'astronomo americano Charles Dillon Perrine scoprì Giove Sesto nel dicembre 1904 e Giove Settimo nel gennaio 1905. Giove Sesto ha un diametro di circa 96 chilometri e Giove Settimo di circa 32. Giove Ottavo fu scoperto nel 1908 dall'astronomo britannico P. J. Melotte, mentre l'astronomo americano Seth B. Nicholson scoprì Giove Nono nel 1914, Giove Decimo e Giove Undicesimo nel 1938 e Giove Dodicesimo nel 1951. Questi ultimi quattro hanno tutti diametro di circa 24 chilometri.

Infine, il 10 settembre 1974, l'astronomo americano Charles T. Kowal scoprì Giove Tredicesimo, che ha soltanto 16 chilometri di diametro.

Questi satelliti esterni si possono suddividere in due gruppi. I quattro più interni - Sesto, Settimo, Decimo e Tredicesimo - hanno una distanza media da Giove che si aggira sugli 11 milioni di chilometri e che è quindi circa sei volte la distanza di Callisto (il satellite galileiano più esterno). Gli altri quattro distano, in media, circa 22 milioni di chilometri da Giove, quindi circa il doppio dei quattro intermedi.

I satelliti galileiani si muovono tutti intorno a Giove nel piano dell'equatore del pianeta, seguendo orbite quasi esattamente circolari. Si tratta di una situazione prevedibile, prodotta dall'effetto di marea (di cui parlerò nel prossimo capitolo) esercitato da Giove sui satelliti. Se l'orbita di un satellite non si trova sul piano equatoriale (cioè, se essa è "inclinata"), o se non è circolare (cioè, se è "eccentrica"), con il tempo l'effetto di marea la riporta nel piano equatoriale, e la rende circolare.

L'effetto di marea è proporzionale alla massa del corpo che lo esercita, mentre diminuisce rapidamente con la distanza ed è proporzionale alle dimensioni del corpo che lo subisce. Pertanto, nonostante la sua massa enorme, Giove esercita solo un debole effetto di marea sui piccoli satelliti esterni. Quindi, anche se quattro di essi si trovano circa alla stessa distanza media da Giove, e altri quattro sono tutti circa a una stessa distanza, diversa dalla precedente, non vi è pericolo immediato di collisione. Avendo ciascuno l'orbita inclinata diversamente e diversamente eccentrica, nessuno di essi si avvicina agli altri mentre tutti quanti ruotano intorno a Giove.

I quattro satelliti del gruppo più esterno hanno un'orbita talmente inclinata da aver subìto (per così dire) una sorta di capovolgimento: pertanto essi ruotano intorno a Giove in senso retrogrado, cioè orario (se si immagina di guardarli stando sopra al polo nord del pianeta), anziché antiorario, come fanno tutti gli altri satelliti di Giove.

È possibile che questi piccoli satelliti esterni siano degli asteroidi catturati (cosa che discuterò più avanti in questo capitolo); se così fosse, l'irregolarità delle loro orbite potrebbe essere dovuta al fatto che fanno parte del sistema dei satelliti di Giove relativamente da poco tempo (solo da quando sono stati catturati); quindi l'effetto di marea ha avuto meno tempo per modificare le loro orbite. Inoltre si può dimostrare che è più facile per un pianeta catturare un satellite se esso si avvicina in modo tale da entrare in un'orbita retrograda intorno al pianeta stesso.

Il satellite che si allontana di più da Giove è Giove Ottavo, chiamato oggi Pasifae. (Negli ultimi anni sono stati dati ai satelliti esterni nomi mitologici poco noti.) La sua orbita è talmente eccentrica che Pasifae, quando si trova nel suo punto più lontano, dista 33 milioni di chilometri da Giove, più di 80 volte la distanza massima della luna dalla terra. È questo il caso, fra quelli noti, di massimo allontanamento di un satellite dal pianeta intorno a cui gira.

Giove Nono (Sinope) ha una distanza media leggermente maggiore di quella di Pasifae e pertanto impiega più tempo a percorrere tutta l'orbita intorno a Giove. Sinope compie una rivoluzione completa intorno al pianeta in 758 giorni, quasi esattamente due anni e un mese terrestri. Nessun altro satellite noto ha un periodo di rivoluzione così lungo.

FORMA E SUPERFICIE DI GIOVE.

E adesso torniamo a parlare del pianeta. Nel 1691 Cassini, studiando Giove con il suo telescopio, notò che non si presentava come un cerchio luminoso, ma come un'ellisse quasi perfetta. Questa osservazione significava, tradotta nelle tre dimensioni, che Giove non era una sfera, ma uno sferoide schiacciato, abbastanza simile a un mandarino.

Il fatto era stupefacente, perché il sole e la luna (nella fase di luna piena) erano cerchi luminosi perfetti e sembravano pertanto sfere perfette. Tuttavia, le teorie di Newton (allora una novità) spiegavano benissimo la situazione. Come vedremo nel prossimo capitolo, ci si deve aspettare che una sfera "in rotazione" diventi uno sferoide schiacciato; la rotazione, infatti, obbliga la sfera a ingrossarsi nelle regioni equatoriali e ad appiattirsi ai poli; più essa è veloce, più marcata è la deviazione dalla forma sferica.

Quindi, il diametro che congiunge un punto dell'equatore con un punto opposto, sempre sull'equatore (il "diametro equatoriale") deve essere maggiore del diametro che congiunge il polo nord al polo sud (il diametro polare). Il diametro equatoriale di Giove, che è quello indicato solitamente nei testi di astronomia, è di 142750 chilometri, mentre il diametro polare è solo di 134000 chilometri. La differenza tra i due è poco meno di 9000 chilometri (circa due terzi del diametro totale della terra) e questa differenza, divisa per il diametro equatoriale, dà un parametro che viene chiamato "schiacciamento". Lo schiacciamento di Giove è 0,062, o, in frazione, circa un sedicesimo.

Mercurio, Venere e la luna, che ruotano molto lentamente, non hanno uno schiacciamento misurabile. Il sole, pur ruotando con una certa velocità, ha una tal forza gravitazionale da non poter subire un significativo rigonfiamento all'equatore, e quindi non ha uno schiacciamento apprezzabile. La terra ruota non troppo rapidamente, e ha un piccolo schiacciamento: 0,0033. Anche Marte ha una moderata velocità di rotazione e una forza gravitazionale minore di quella terrestre a contrastare la tendenza al rigonfiamento equatoriale: il suo schiacciamento è 0,0052.

Lo schiacciamento di Giove è circa diciannove volte quello della terra, nonostante la sua forza gravitazionale molto maggiore; c'è quindi da aspettarsi che Giove ruoti sul proprio asse molto più rapidamente: così è infatti. Lo stesso Cassini, nel 1665, aveva seguito lo spostamento graduale di certi segni sulla superficie del pianeta, notando che il periodo di rotazione era di poco inferiore alle dieci ore. (Oggi lo si valuta pari a 9,85 ore, cioè due quinti di un giorno terrestre.)

Giove ha un periodo di rotazione molto più breve di quello della terra, pur essendo di gran lunga più grande di questa. Un punto situato sull'equatore terrestre percorre 1670 chilometri in un'ora, descrivendo un cerchio completo nelle 24 ore. Un punto situato sull'equatore di Giove dovrebbe percorrere 45 mila chilometri in un'ora per completare un intero circuito in 9,85 ore.

Le macchie osservate da Cassini (e dopo di lui da altri astronomi) cambiavano di continuo, così che non sembravano far parte di una superficie solida. Ciò che questi astronomi osservavano sembrava più probabilmente uno strato di nubi, come nel caso di Venere; le macchie, allora, potevano essere sistemi ciclonici. Vi erano inoltre bande colorate parallele all'equatore, che potevano essere dovute a venti costanti. Per la maggior parte Giove ha un colore giallo, mentre le bande variano dall'arancione al marrone, con qualche tratto bianco, o azzurro o grigio.

La particolarità più notevole sulla superficie di Giove fu osservata per la prima volta dallo scienziato inglese Robert Hooke nel 1664; e nel 1672 Cassini fece un disegno di Giove in cui essa compariva come una grande macchia rotonda. La macchia comparve in altri disegni degli anni successivi; ma fu solo nel 1878 che essa venne descritta con grande rilievo da un astronomo tedesco, Ernst Wilhelm Tempel. In quel periodo sembrava decisamente rossa, e da allora è sempre stata indicata con il nome di «grande macchia rossa». Il colore cambia con il tempo, qualche volta diventando così pallido che non si riesce quasi a scorgere la macchia con un telescopio mediocre. Vista dalla terra, si presenta come un ovale del diametro di 48 mila chilometri da est a ovest e 13 mila chilometri da nord a sud.

Alcuni astronomi si son chiesti se la grande macchia rossa non sia un enorme tornado. In effetti, Giove è talmente grande e ha una tal massa che si era congetturato potesse essere molto più

caldo degli altri pianeti, addirittura quasi rovente. La grande macchia rossa avrebbe potuto effettivamente essere una regione di alte temperature.

Tuttavia, anche se Giove deve indubbiamente raggiungere temperature elevatissime al suo interno, lo stesso non vale per la sua superficie. Nel 1926 un astronomo americano, Donald Howard Menzel, dimostrò che la temperatura di Giove nello strato di nubi visibile è di meno 135 gradi C.

LA COMPOSIZIONE DI GIOVE.

Stante la sua bassa densità, Giove deve essere ricco di materiale meno denso delle rocce e dei metalli.

I materiali più comuni nell'universo in generale sono l'idrogeno e l'elio. Gli atomi di idrogeno costituiscono circa il 90 per cento di tutti gli atomi esistenti, e quelli di elio contribuiscono con un altro 9 per cento. Ciò non sorprende se si considera che gli atomi d'idrogeno sono i più semplici che esistano, mentre al secondo posto per semplicità stanno gli atomi di elio. Tra i restanti atomi, il grosso è formato da carbonio, ossigeno, azoto, neon e zolfo. Gli atomi di idrogeno e di ossigeno si combinano formando molecole di acqua; quelli di idrogeno e carbonio si combinano formando molecole di metano; gli atomi di idrogeno e di azoto si combinano formando molecole di ammoniaca.

In condizioni ordinarie le densità di tutte queste sostanze sono o uguali o inferiori a quella dell'acqua. Sotto pressioni elevate, quali prevarrebbero all'interno di Giove, le loro densità possono diventare maggiori di quella dell'acqua. Se Giove fosse costituito di tali sostanze, ciò spiegherebbe la sua bassa densità.

Nel 1932 un astronomo tedesco, Rupert Wildt, studiò la luce riflessa da Giove e trovò che erano assorbite precisamente quelle lunghezze d'onda che vengono assorbite da ammoniaca e metano. Egli concluse che almeno queste due sostanze sono presenti nell'atmosfera di Giove.

Nel 1952 Giove doveva passare davanti alla stella Sigma Arietis, e tale evento fu osservato attentamente da due astronomi americani, William Alvin Baum e Arthur Dodd Code. Quando la stella si avvicinò al globo di Giove, la sua luce attraversò la sottile atmosfera al di sopra dello strato di nubi del pianeta. Dall'assorbimento subìto fu possibile dedurre che tale atmosfera era costituita principalmente di idrogeno ed elio. Nel 1963 ricerche effettuate dall'astronomo americano Hyron Spinrad mostrarono che era presente anche neon.

Tutte queste sostanze sono gas, nelle condizioni terrestri; e dato che costituiscono la maggior parte della struttura di Giove, parve giusto chiamare quest'ultimo un "gigante gassoso".

Le prime sonde inviate su Giove furono "Pioneer 10" e "Pioneer 11", che furono lanciate rispettivamente il 2 marzo 1972 e il 5 aprile 1973. "Pioneer 10" passò a soli 136 mila chilometri dalla superficie visibile di Giove il 3 dicembre 1973, mentre "Pioneer 11" passò a soli 42 mila chilometri un anno dopo, il 2 dicembre 1974 - sorvolando il polo nord del pianeta, che pertanto gli esseri umani videro allora per la prima volta.

Le due sonde successive, assai più sofisticate, furono "Voyager 1" e "Voyager 2", che vennero lanciate rispettivamente il 20 agosto e il 5 settembre 1977 e passarono a distanza ravvicinata da Giove nel marzo e nel luglio del 1979.

Queste sonde confermarono le precedenti deduzioni sull'atmosfera di Giove, che risultò costituita in gran parte da idrogeno ed elio, nel rapporto di circa 10 a 1 (press'a poco la situazione dell'universo in generale). I componenti che non erano stati rilevati dalla terra erano etano e acetilene (entrambi combinazioni di carbonio e di idrogeno), acqua, ossido di carbonio, fosfina e tetraidruro di germanio.

Indubbiamente la chimica dell'atmosfera di Giove è molto complessa, e non ne sapremo abbastanza in proposito finché non riusciremo a inviarvi una sonda che sopravviva in quell'atmosfera abbastanza a lungo per trasmetterci maggiori informazioni. La grande macchia

rossa è (come avevano sospettato quasi tutti gli astronomi) un uragano gigantesco, più grande della terra, pressoché permanente.

A quanto pare, tutto il pianeta è liquido. La temperatura cresce rapidamente con la profondità, e le pressioni trasformano l'idrogeno in un liquido rovente. Al centro potrebbe esserci un nucleo di idrogeno metallico incandescente allo stato solido. (Le condizioni nell'interno più profondo di Giove sono troppo estreme per poterle per ora riprodurre sulla terra, e potrà occorrere un certo tempo prima che si riesca a effettuarne una stima sicura.)

L'ESPLORAZIONE DI GIOVE PER MEZZO DI SONDE.

Le sonde inviate verso Giove hanno ripreso diverse fotografie dei quattro satelliti galileiani molto da vicino, e per la prima volta l'occhio umano ha potuto vedere qualcosa di più che dei minuscoli cerchietti privi di dettagli.

Si sono ottenute informazioni più precise sulle loro dimensioni e masse effettive; ciò comportò solo delle correzioni di poco conto, anche se Io, il satellite galileiano più interno, risultò dotato di una massa superiore di un quarto rispetto a quella che gli era stata attribuita in precedenza.

Ganimede e Callisto, come si era potuto arguire dalle loro basse densità, sono costituiti di sostanze leggere, fra cui acqua. Alle basse temperature prevedibili in base alla loro distanza dal sole (e dato che sono corpi piccoli, privi dell'elevato calore interno che caratterizza invece Giove, o anche la terra), queste sostanze sono allo stato solido; pertanto se ne parla come di "ghiacci". Entrambi i satelliti sono cosparsi di numerosi crateri.

I satelliti potrebbero essere riscaldati dall'azione di marea di Giove, che tende a deformarli, creando calore per attrito. Ma l'effetto di marea diminuisce rapidamente al crescere della distanza: Ganimede e Callisto sono abbastanza lontani da Giove perché il riscaldamento dovuto all'effetto di marea sia insignificante, e rimangono allo stato solido.

Europa è più vicino ed è stato troppo caldo, in qualche epoca del passato, perché si potessero formare molti ghiacci; o anche se se ne sono formati, nella maggior parte si sono fusi e vaporizzati, perdendosi nello spazio nel corso della sua storia. (I campi gravitazionali dei satelliti galileiani sono troppo deboli per trattenere un'atmosfera in presenza del riscaldamento dovuto all'effetto di marea.) Potrebbe essere l'incapacità di accumulare una grande quantità di ghiacci, o il fatto di averli persi dopo averli accumulati, la causa per cui Europa e Io sono decisamente più piccoli di Ganimede e Callisto.

Europa ha comunque trattenuto una quantità di ghiacci sufficiente per essere interamente coperto da un oceano (come una volta si pensava fosse Venere). Alla temperatura di Europa, tale oceano assume la forma di un ghiacciaio che ricopre tutto il satellite. Cosa più singolare, questo ghiacciaio è notevolmente levigato (Europa è il mondo solido più levigato che gli astronomi abbiano finora incontrato), anche se è attraversato in tutte le direzioni da segni scuri e sottili, che lo fanno assomigliare in modo notevole alle mappe di Lowell del pianeta Marte.

Il fatto che il ghiacciaio sia levigato e non cosparso di crateri, induce a supporre che al di sotto possa esservi dell'acqua liquida, fusa dal riscaldamento dovuto alla marea. Impatti di meteoriti, se abbastanza grandi, potrebbero perforare il mantello di ghiaccio, ma in tal caso l'acqua salirebbe in superficie e congelerebbe, saldando il crepaccio. Impatti più piccoli potrebbero causare delle fenditure in continuo mutamento; le crepe potrebbero anche essere dovute a effetti di marea o ad altri fattori. Nel complesso, tuttavia, la superficie resta levigata.

Io, il satellite galileiano più interno, è quello che viene maggiormente riscaldato ad opera delle maree e sembra essere del tutto privo di liquidi. Ancor prima dell'arrivo delle sonde, presentava aspetti sconcertanti. Nel 1974 l'astronomo americano Robert Brown riferì che Io era circondato da una nebbia gialla dovuta ad atomi di sodio; anzi, sembrava che viaggiasse attraverso una sottile foschia che riempiva tutta la sua orbita formando una specie di ciambella intorno a Giove. Io doveva essere all'origine della nebbia, ma non si sapeva come.

Le sonde Pioneer dimostrarono che Io ha effettivamente una tenue atmosfera di densità pari circa a 1 su 20 mila di quella terrestre, e le sonde "Voyager" risolvettero il problema scattando delle fotografie che mostrarono che Io possiede dei vulcani attivi. Sono gli unici vulcani attivi di cui si abbia notizia oltre a quelli della terra.

Sembra dunque che sotto alla superficie di Io giacciano delle regioni di rocce fuse (riscaldate dall'azione di marea di Giove), che in vari punti sono violentemente emerse alla superficie attraverso la crosta, emettendo getti di sodio e di zolfo, e dando così luogo all'atmosfera e alla «ciambella» orbitale. La superficie di Io è incrostata di zolfo, che le conferisce un colore giallo-marrone. Io non è ricco di crateri, perché questi ultimi sono stati riempiti dal materiale vulcanico. Soltanto alcuni segni scuri indicano la presenza di crateri troppo recenti per esser stati colmati.

All'interno dell'orbita di Io si trova il satellite Amaltea, che dalla terra appare niente più che un puntino luminoso. Le sonde "Voyager" mostrarono che esso è un corpo irregolare, come i due satelliti di Marte, ma molto più grande. I diametri di Amaltea variano da 265 a 140 chilometri.

Sono stati scoperti anche altri tre satelliti, tutti più vicini a Giove e considerevolmente più piccoli di Amaltea: si tratta di Giove Quattordicesimo, Giove Quindicesimo e Giove Sedicesimo; i loro diametri sono stimati rispettivamente 24, 80 e 40 chilometri. Nelle condizioni attuali nessuno di questi satelliti può essere visto dalla terra, a causa della loro piccolezza e della vicinanza allo splendore di Giove.

Giove Sedicesimo è il più vicino al pianeta, avendo una distanza di soli 128 mila chilometri dal suo centro - si trova, cioè, soltanto 58 mila chilometri al di sopra del suo strato di nubi. Esso ruota intorno a Giove in 7,07 ore. Giove Quattordicesimo è solo un poco più lontano, e percorre la sua orbita in 7,13 ore. Entrambi si muovono intorno a Giove con una velocità maggiore di quella con cui il pianeta ruota sul proprio asse, così che, se li si potesse osservare dallo strato di nubi di Giove, sembrerebbero levarsi a ovest e tramontare a est, come avviene per Phobos osservato da Marte. Entro l'orbita del satellite più interno vi sono dei detriti che assumono l'aspetto di un sottile anello discontinuo di frammenti che girano intorno a Giove; esso è troppo sottile e rado per essere visto dalla terra con i mezzi ordinari.

SATURNO.

Saturno era il più lontano tra i pianeti conosciuti nell'antichità: infatti, nonostante la sua distanza, brilla in modo considerevole. Al massimo del suo splendore, raggiunge una magnitudine di meno 0,75, che lo rende più luminoso di qualsiasi stella, salvo Sirio. Risplende anche più di Mercurio e, comunque, è più facile da osservare, in quanto, essendo più lontano di noi dal sole, non rimane necessariamente nelle vicinanze di quest'ultimo, e lo si può veder brillare anche nel cielo di mezzanotte.

La sua distanza media dal sole è di 1427 milioni di chilometri, pari a 1,83 volte la distanza sole-Giove. Saturno compie il suo giro intorno al sole in 29,458 anni, mentre il periodo di rivoluzione di Giove è pari a 11,862 anni. L'anno saturniano è pertanto lungo due volte e mezzo l'anno di Giove.

Sotto molti aspetti, Saturno fa la parte del secondo violino rispetto a Giove. Per grandezza, ad esempio, occupa il secondo posto tra tutti i pianeti, dopo Giove. Il suo diametro equatoriale è di 120 mila chilometri, all'incirca i 5 sesti di quello di Giove. Sono queste dimensioni minori, insieme alla maggiore distanza per cui la luce solare che lo raggiunge ha solo la metà dell'intensità di quella che giunge su Giove, a far sì che Saturno sia molto meno luminoso di Giove. D'altra parte, Saturno è ancora abbastanza grande da fare la sua figura.

La massa di Saturno è 95,1 volte quella della terra, il che lo rende, dopo Giove, il pianeta più massivo. La sua massa è solo i tre decimi di quella di Giove, nonostante che il suo volume sia sei decimi di quello di Giove.

Per avere una massa così piccola in un volume così grande, Saturno deve avere una densità molto bassa; infatti è l'oggetto meno denso che conosciamo nel sistema solare, avendo una densità globale che è solo 0,7 volte quella dell'acqua. Se fosse possibile avvolgerlo nella plastica (per impedirgli di disperdersi o dissolversi) e immergerlo in un oceano abbastanza grande da contenerlo, Saturno galleggerebbe. È presumibile che la materia che costituisce Saturno sia ancora più ricca dell'elemento più leggero, l'idrogeno, e più povera per quanto riguarda tutti gli altri elementi di quella di Giove. Inoltre la minor gravità di Saturno non arriva a comprimere fortemente la materia che lo compone, come invece accade su Giove.

Saturno ruota rapidamente, ma, pur essendo leggermente più piccolo, non ha la velocità di Giove. Saturno gira sul suo asse in 10,67 ore, e quindi il suo giorno è dell'otto per cento più lungo di quello di Giove.

Anche se Saturno ruota più lentamente di Giove, gli strati esterni del primo sono meno densi di quelli del secondo; inoltre Saturno ha una minor attrazione gravitazionale per trattenerli. Ne consegue che Saturno ha il massimo rigonfiamento equatoriale ed è l'oggetto più schiacciato del sistema solare. Il suo schiacciamento è 0,102, 1,6 volte quello di Giove e 30 volte quello della terra: il suo diametro equatoriale è di 120 mila chilometri, mentre quello polare è di soli 108 mila. La differenza è di 12 mila chilometri, quasi pari al diametro della terra.

GLI ANELLI DI SATURNO.

Sotto un altro aspetto Saturno risulta unico - e singolarmente bello. Quando Galileo puntò per la prima volta su Saturno il suo primitivo telescopio, gli sembrò che esso avesse una forma strana, quasi che ai lati del suo globo se ne trovassero altri due più piccoli. Galileo proseguì nelle sue osservazioni, ma i due piccoli globi divennero sempre più difficili da scorgersi e infine, verso la fine del 1612, scomparvero del tutto.

Anche altri astronomi riferirono che c'era qualcosa di strano in Saturno, ma fu solo nel 1656 che Christiaan Huygens diede alla cosa la giusta interpretazione. Egli riferì che Saturno era circondato da un sottile anello luminoso, che non lo toccava in nessun punto.

L'asse di rotazione di Saturno è inclinato, come lo è quello della terra; l'inclinazione dell'asse di Saturno è di 26,73 gradi, mentre quello della terra è di 23,45 gradi. L'anello di Saturno è situato nel suo piano equatoriale, ed è dunque inclinato rispetto a noi e al sole.

Quando Saturno percorre un estremo della sua orbita, vediamo dal di sopra la parte dell'anello più vicina a noi, mentre quella più lontana ci rimane nascosta; quando, invece, Saturno si trova all'altro estremo dell'orbita, vediamo dal di sotto la porzione dell'anello più vicina, ed è sempre quella lontana che resta nascosta alla nostra vista.

Saturno impiega poco più di 14 anni per andare da un capo all'altro della sua orbita; durante questo periodo l'anello passa lentamente da una posizione in cui risulta in basso a un'altra in cui risulta in alto. Allorché il pianeta si trova esattamente a mezza strada, l'anello ci appare perfettamente di profilo. Quando poi Saturno percorre l'altra metà dell'orbita per tornare al punto di partenza, l'anello torna a cambiare lentamente aspetto in senso inverso, e anche questa volta, a metà strada, ci appare di profilo. Accade dunque due volte nel corso di ogni rivoluzione di Saturno, cioè a intervalli di poco più di quattordici anni, che l'anello ci si presenti di profilo; in tale posizione esso, essendo estremamente sottile, scompare completamente. Proprio questa era la situazione quando Galileo lo osservò alla fine del 1612, dopo di che, a causa della delusione provata, non volle mai più osservarlo (o almeno così vuole la tradizione).

Nel 1675 Cassini notò che l'anello di Saturno non era una curva ininterrotta di luce, ma presentava una linea circolare scura, che lo suddivideva in una sezione interna e una esterna: quest'ultima era più stretta e meno luminosa dell'altra. Sembrava dunque che gli anelli fossero due, uno dentro all'altro; da allora, infatti, si è sempre parlato di anelli, al plurale. La linea scura è oggi chiamata divisione di Cassini.

L'astronomo russo-tedesco Friedrich G. W. von Struve nel 1826 chiamò anello A quello esterno e anello B quello interno. Nel 1850 un astronomo americano, William Cranch Bond, riferì di un anello poco luminoso ancora più vicino a Saturno dell'anello B. Questo anello poco luminoso è l'anello C; tra esso e l'anello B non sussiste una divisione osservabile.

Non esiste nulla di simile agli anelli di Saturno né nel sistema solare né in qualsiasi parte dell'universo osservabile con i nostri strumenti. È vero che oggi sappiamo che Giove è circondato da un sottile anello di materia, ed è anche possibile che qualsiasi pianeta gigante gassoso, come Giove o Saturno, abbia nelle sue immediate vicinanze un anello di detriti. Tuttavia, se l'anello di Giove è tipico, si tratta di oggetti affatto modesti, mentre il sistema di anelli di Saturno è grandioso. A quanto risulta da misure effettuate dalla terra, il sistema di anelli di Saturno si estende, da un estremo all'altro, per 270 000 chilometri, cioè 21 volte il diametro della terra e quasi il doppio del diametro di Giove.

Che cosa sono gli anelli di Saturno? Cassini pensò che fossero oggetti lisci e compatti, simili ai cerchietti flessibili usati per giocare; nel 1785, però, Laplace (che più tardi avrebbe proposto l'ipotesi della nebulosa) fece osservare che le varie zone degli anelli si trovavano a distanza diversa dal centro di Saturno e perciò erano sottoposte a forze di diversa intensità da parte del campo gravitazionale del pianeta. Questa differenza di attrazione gravitazionale altro non è che l'effetto di marea di cui ho già parlato, che tenderebbe a frantumare l'anello. Laplace pensò che gli anelli potessero essere in realtà una serie di anelli molto sottili, situati talmente vicini tra loro da apparire, visti dalla terra, compatti.

Nel 1855, tuttavia, Maxwell (che più tardi avrebbe previsto l'esistenza di un'ampia banda di radiazione elettromagnetica) mostrò che anche la proposta di Laplace non era una spiegazione sufficiente.

Per non spezzarsi sotto l'azione della forza di marea, gli anelli dovevano essere formati da frammenti relativamente piccoli di innumerevoli meteoriti, distribuiti intorno a Saturno in modo tale da suscitare, nell'osservatore terrestre, l'impressione di anelli compatti. In seguito non si nutrì più alcun dubbio circa la correttezza dell'ipotesi di Maxwell.

Affrontando da un punto di vista diverso il problema dell'effetto di marea, un astronomo francese, Edouard Roche, dimostrò che qualsiasi corpo solido che si fosse avvicinato a un altro corpo considerevolmente più grande sarebbe stato ridotto, a causa delle potenti forze di marea, in piccoli frammenti. La distanza alla quale il corpo più piccolo finirebbe per essere fatto a pezzi viene chiamata "limite di Roche", e di solito viene valutata pari a 2,44 volte il "raggio equatoriale" (la distanza dal centro a un punto situato sull'equatore) del corpo più grande.

Così, il limite di Roche per Saturno è 2,44 volte il raggio equatoriale del pianeta, che misura 60 mila chilometri (metà del diametro equatoriale), cioè è pari a 146 mila chilometri. Il margine esterno dell'anello A dista 136 mila chilometri dal centro di Saturno, così che l'intero sistema degli anelli giace entro il limite di Roche (anche l'anello di Giove è situato entro il relativo limite di Roche).

Sembra quindi che gli anelli di Saturno siano formati da detriti che non hanno mai potuto aggregarsi formando un satellite (come farebbero invece dei detriti situati oltre il limite di Roche - e come, a quanto pare, in altri casi hanno fatto), o che siano composti dai frammenti di ciò che un tempo era un satellite, che per qualche ragione si sia avventurato troppo vicino e sia stato ridotto in pezzi. In entrambi i casi, ciò che rimane è un ammasso di corpi molto piccoli. (L'effetto di marea diminuisce con il diminuire delle dimensioni del corpo che lo subisce; a un certo punto i frammenti sono così piccoli che si arresta ogni ulteriore frammentazione, salvo forse quella dovuta a collisioni occasionali tra i frammenti stessi.) Secondo alcune stime, se si raccogliesse in un unico corpo tutta la materia contenuta negli anelli di Saturno, si otterrebbe una sfera poco più grande della nostra luna.

I SATELLITI DI SATURNO.

Oltre agli anelli, Saturno, come Giove, ha una schiera di satelliti.

Il primo di questi fu scoperto da Huygens nel 1656, lo stesso anno in cui egli scoprì gli anelli. Due secoli dopo, il satellite fu chiamato Titano; nella mitologia greca i Titani erano un gruppo di divinità di cui faceva parte anche Saturno (Cronos). Titano è un corpo grande, quasi delle stesse dimensioni di Ganimede, rispetto al quale è però meno denso, così che la differenza delle loro masse è ancora maggiore di quella tra i loro volumi. Esso resta comunque il secondo satellite del sistema solare, sia in ordine di diametro che in ordine di massa.

C'è però un aspetto per cui Titano non è (fino a oggi) secondo a nessuno dei satelliti. Più distante dal sole e pertanto più freddo rispetto ai satelliti di Giove, riesce meglio a trattenere le molecole di gas, rallentate dal freddo, nonostante la sua piccola gravità superficiale. Nel 1944 l'astronomo olandese-americano Gerard P. Kuiper riuscì a stabilire al di là di ogni dubbio la presenza di un'atmosfera intorno a Titano e trovò che essa conteneva del metano. Le molecole di metano sono fatte di un atomo di carbonio e quattro di idrogeno (CH4); il metano è il principale costituente del gas naturale sulla terra.

Al tempo della scoperta di Titano, si conoscevano in tutto cinque altri satelliti: la luna e i quattro satelliti galileiani di Giove; tutti e cinque avevano pressappoco le stesse dimensioni, molto più vicine tra loro di quanto non fossero quelle dei pianeti noti. Tra il 1671 e il 1684, Cassini scoprì altri quattro satelliti di Saturno, ciascuno dei quali aveva invece un diametro decisamente inferiore a quello di Europa, il più piccolo dei satelliti galileiani. I diametri andavano da 1450 chilometri, per il satellite più grande tra quelli scoperti da Cassini (oggi chiamato Giapeto), a 1050 chilometri per quello più piccolo (Teti). Da allora si comprese che i satelliti potevano anche essere molto piccoli.

Alla fine del diciannovesimo secolo si conoscevano nove satelliti di Saturno. L'ultimo dei nove a essere scoperto fu Febea, che fu avvistato per la prima volta dall'astronomo americano William Henry Pickering, ed è di gran lunga il satellite più lontano, con la sua distanza media da Saturno di 13 milioni di chilometri; esso gira intorno a Saturno in 549 giorni, in senso retrogrado, ed è anche il più piccolo dei satelliti, con un diametro di circa 190 chilometri (da qui il fatto che fu scoperto così tardi, dato che piccolezza vuol dire scarsa luminosità).

Tra il 1979 e il 1981, tre sonde che erano passate in precedenza vicino a Giove - "Pioneer 11", "Voyager 1" e "Voyager 2" - inviarono primi piani anche di Saturno, dei suoi anelli e satelliti.

Titano fu, naturalmente, uno degli obiettivi principali, a causa della sua atmosfera. Alcuni segnali radio inviati da "Voyager 1" verso la terra sfiorarono l'atmosfera di Titano, e parte della loro energia fu assorbita; dai particolari di tale assorbimento si poté dedurre che l'atmosfera del satellite era inaspettatamente densa. Dalla quantità di metano precedentemente rilevata dalla terra si era pensato che Titano potesse avere un'atmosfera di densità pari a quella di Marte; ma le cose non stavano così. La sua atmosfera aveva una densità pari a 150 volte quella dell'atmosfera di Marte, e anzi era probabilmente 1,5 volte più densa di quella della terra.

La spiegazione di questo valore così sorprendentemente alto stava nel fatto che, dalla terra, si era potuto individuare solo il metano e, se questo ne fosse stato l'unico componente, l'atmosfera di Titano sarebbe stata effettivamente assai poco densa. Ma adesso sappiamo che il metano costituisce soltanto il 2 per cento dell'atmosfera di Titano, mentre il resto è azoto, un gas difficile da individuarsi in base alle sue proprietà di assorbimento.

La densa atmosfera di Titano è molto nebbiosa, il che impedisce la vista della superficie solida. Tuttavia la stessa nebbia riveste un grande interesse. Il metano è una molecola che "polimerizza" facilmente - cioè che si combina con se stessa formando molecole più grosse. Quindi gli scienziati possono abbandonarsi alle congetture, immaginando che su Titano vi siano degli oceani o una fanghiglia fatti di molecole abbastanza complesse contenenti carbonio. Anzi, possiamo trastullarci con l'idea che Titano possa essere ricoperto di asfalto, con affioramenti di benzina solidificata e che possa contenere sfavillanti laghi di metano e di etano.

Gli altri satelliti di Saturno sono costellati di crateri, come c'era da aspettarsi. Mimante, il più interno dei nove, ne contiene uno talmente grande (rispetto alle dimensioni del satellite) che l'impatto che lo ha prodotto deve aver quasi mandato in frantumi il satellite stesso.

Encelado, il secondo dei nove, è invece relativamente privo di crateri, così che si può pensare che sia stato parzialmente fuso dal riscaldamento dovuto alle forze di marea. Iperione è il satellite con la forma meno sferica e ha un diametro che varia da 110 a 190 chilometri. La sua forma assomiglia piuttosto a quella dei satelliti di Marte, ma non le sue dimensioni che sono abbastanza grandi per autorizzarci a pensare che dovrebbe essere pressoché sferico in conseguenza della sua forza gravitazionale. Forse si è spezzato in tempi recenti.

Giapeto, fin da quando è stato scoperto, nel 1671, ha esibito una peculiarità: la sua luminosità è cinque volte maggiore quando si trova a ovest di Saturno rispetto a quando si trova a est. Dato che mantiene sempre la stessa faccia rivolta verso Saturno, noi vediamo un emisfero o l'altro di Giapeto a seconda della sua posizione rispetto al pianeta. Ciò aveva suscitato la naturale supposizione che un emisfero fosse in grado di riflettere la luce solare cinque volte di più dell'altro emisfero. Le fotografie scattate da "Voyager 1" confermarono tale supposizione. Giapeto è ora luminoso ora oscuro, come se una faccia fosse coperta di ghiacci e l'altra di polvere scura. Non si conosce ancora la ragione di tale differenza.

Le sonde dirette verso Saturno sono riuscite a scoprire otto piccoli satelliti, troppo piccoli perché li si potesse scorgere dalla terra; così il numero dei satelliti di Saturno è salito a diciassette. Di questi otto nuovi satelliti, cinque sono più vicini a Saturno di Mimante. Il più vicino di essi dista solo 137 mila chilometri dal centro di Saturno (77 mila chilometri dallo strato di nubi che sovrasta il pianeta) e compie una rivoluzione in 14,43 ore.

Due dei satelliti che si trovano all'interno dell'orbita di Mimante hanno una caratteristica insolita: sono "coorbitali", cioè hanno un'orbita comune, sulla quale si inseguono senza fine, girando intorno a Saturno. Si tratta del primo esempio di satelliti coorbitali di cui si sia venuti a conoscenza. Essi si trovano a una distanza di 151 mila chilometri dal centro di Saturno e girano intorno al pianeta in 16,68 ore. Nel 1967 un astronomo francese, Andouin Dollfus, aveva riferito dell'esistenza di un satellite interno all'orbita di Mimante e lo aveva chiamato Giano; probabilmente si trattava di un avvistamento di uno qualsiasi dei satelliti interni a Mimante, ma ne conseguirono dei dati orbitali erronei, perché forse in momenti diversi furono localizzati satelliti differenti. Giano oggi non compare più nell'elenco dei satelliti di Saturno.

Anche gli altri tre satelliti scoperti di recente presentano situazioni senza precedenti. Dione, un satellite che si conosceva da tempo, essendo stato scoperto da Cassini, è risultato in possesso di un minuscolo compagno coorbitale. Mentre Dione ha un diametro di 1100 chilometri, il compagno (Dione-B) ha un diametro di soli 32 chilometri circa. Nel suo moto di rivoluzione intorno a Saturno, Dione-B precede Dione di 60 gradi, così che Saturno, Dione e Dione-B si trovano sempre ai vertici di un triangolo equilatero. Questa è ciò che si chiama una situazione troiana, per ragioni che spiegherò più avanti.

Tale situazione, possibile solo quando il terzo corpo è molto più piccolo dei primi due, può verificarsi quando il corpo più piccolo si trova 60 gradi avanti o indietro rispetto a quello più grande. Se si trova più avanti, è nella posizione L-4; se si trova più indietro è nella posizione L-5. Dione-B si trova nella posizione L-4. (La lettera L è l'iniziale del nome dell'astronomo italo-francese Joseph Louis Lagrange, che, nel 1772, calcolò che tale configurazione era gravitazionalmente stabile.)

C'è poi Teti, un altro dei satelliti di Cassini, che ha due compagni coorbitali: Teti-B in posizione L-4 e Teti-C in posizione L-5.

La famiglia dei satelliti di Saturno è dunque la più ricca e la più complessa del sistema solare, per quanto ne sappiamo fino a oggi.

Anche gli anelli di Saturno sono assai più complessi di quanto non si fosse pensato. Osservati da vicino, essi risultano formati da centinaia, forse addirittura da migliaia di piccoli anelli

sottili, paragonabili ai solchi di un disco. In certi punti si notano delle bande scure perpendicolari agli anelli, paragonabili ai raggi di una ruota. C'è poi un tenue anello esterno che appare formato di tre anelli più sottili intrecciati. Nessuno di questi aspetti ha una spiegazione per il momento, anche se è opinione generale che una semplice spiegazione basata sulla gravitazione debba essere integrata prendendo in considerazione effetti di natura elettrica.

I PIANETI PIU' ESTERNI.

Ai tempi in cui non si disponeva ancora del telescopio, Saturno era il pianeta più lontano e più lento che fosse noto. Era inoltre il meno luminoso, pur restando un oggetto di prima magnitudine. Per migliaia di anni, dopo che ci si era resi conto dell'esistenza dei pianeti, non sembra si sia pensato alla possibilità che esistessero pianeti troppo distanti, e quindi troppo poco luminosi per essere visibili.

URANO.

Anche dopo che Galileo ebbe dimostrato che vi sono miriadi di stelle troppo fioche per essere viste senza telescopio, non sembra che la possibile esistenza di pianeti invisibili a occhio nudo abbia suscitato particolare interesse.

Ma poi, il 13 marzo 1781, William Herschel (non ancora famoso), mentre stava effettuando misure di posizioni stellari nella costellazione dei Gemelli, si avvide di un oggetto che non era un punto luminoso, ma aveva piuttosto l'aspetto di un piccolo disco. Inizialmente credette che si trattasse di una cometa lontana, perché le comete erano gli unici oggetti, oltre ai pianeti, che all'osservazione telescopica risultassero simili a dischi. Le comete, però, appaiono indistinte, mentre questo oggetto aveva dei bordi netti. Inoltre si muoveva sullo sfondo delle stelle più lentamente di Saturno, e quindi doveva essere più distante. Era un pianeta lontano, molto più lontano di Saturno, e molto meno luminoso. In seguito al pianeta venne dato il nome di Urano (in greco Ouranos), il dio del cielo e padre di Saturno nella mitologia greca.

La distanza media di Urano dal sole e di 2870 milioni di chilometri, quasi esattamente il doppio di quella di Saturno. Inoltre Urano è più piccolo di Saturno, con un diametro di 51800 chilometri, cioè circa il quadruplo del diametro della terra; pur essendo anch'esso un gigante gassoso come Giove e Saturno, Urano è molto più piccolo. La sua massa è 14,5 volte quella della terra, ma solo 5 su 33 di quella di Saturno e 1 su 22 di quella di Giove.

A causa della sua distanza e delle sue dimensioni relativamente piccole, Urano appare molto più fioco sia di Giove sia di Saturno. Non è però del tutto invisibile a occhio nudo; guardando nella direzione giusta in una notte molto buia, Urano appare visibile come una stella molto debole, anche senza telescopio.

Allora gli astronomi non avrebbero potuto avvistarlo già nei tempi antichi? Sicuramente lo avvistarono, ma una stella molto fioca non poteva attrarre la loro attenzione, dato che allora si credeva che i pianeti fossero molto luminosi. Inoltre, anche se fosse stato osservato per varie notti consecutive, il suo moto è talmente lento che il mutamento della sua posizione sarebbe potuto passare inosservato. Quanto poi ai primi telescopi, essi non erano molto validi, così che, anche se erano puntati nella direzione giusta, non mostravano chiaramente il piccolo disco di Urano.

Eppure, nel 1690, l'astronomo inglese John Flamsteed aveva catalogato una stella nella costellazione del Toro, dandole il nome di 34 Tauri. In tempi successivi altri astronomi non riuscirono a individuare tale stella; ma dopo la scoperta di Urano, quando ormai se ne conosceva l'orbita, facendo dei calcoli retroattivi ci si accorse che si era trovato proprio nel punto in cui Flamsteed aveva indicato la presenza di 34 Tauri. E mezzo secolo più tardi l'astronomo francese Pierre Charles Lemmonier vide Urano in tredici occasioni diverse e lo segnalò in tredici posti diversi, credendo che si trattasse di tredici differenti stelle.

Sul periodo di rotazione di Urano ci sono dati contrastanti. Il valore accettato solitamente per tale periodo era di 10,82 ore; ma nel 1977 si sostenne che esso era di 25 ore. "Voyager 2" ha recentemente stabilito un periodo pari a circa 12 ore.

Una cosa certa sulla rotazione di Urano riguarda l'inclinazione del suo asse, che è di 98 gradi, poco più di un angolo retto. Così sembra che Urano rotoli sul fianco mentre compie la sua rivoluzione di 84 anni intorno al sole; ogni polo è esposto in continuità alla luce solare per quarantadue anni, poi per altri quarantadue resta in una notte continua.

Alla distanza dal sole a cui si trova Urano questo fatto non comporta grandi conseguenze; se fosse invece la terra a ruotare in questo modo, le stagioni avrebbero caratteristiche talmente estreme da mettere in serio dubbio la stessa possibilità dell'evolversi della vita sul nostro pianeta.

Dopo aver scoperto Urano, Herschel seguitò a osservarlo periodicamente, e, nel 1787, avvistò due satelliti, ai quali venne poi dato il nome di Titania e Oberon. Nel 1851 l'astronomo inglese William Lassell scoprì altri due satelliti, più vicini al pianeta, che furono chiamati Ariel e Umbriel. Infine, nel 1948, Kuiper scoprì un quinto satellite, ancora più vicino: Miranda.

Tutti i satelliti di Urano ruotano intorno al pianeta nel suo piano equatoriale così che anche tutto il sistema dei satelliti appare rovesciato su un fianco. I satelliti girano passando a nord e a sud del pianeta, anziché a est e a ovest, come di solito.

I satelliti di Urano sono tutti relativamente vicini al pianeta, e non ne esistono di molto distanti (almeno per quanto possiamo vedere). Il più lontano dei cinque oggi noti è Oberon, che dista 585 mila chilometri dal centro di Urano, solamente una volta e mezza la distanza della luna dalla terra. Miranda dista solo 130 mila chilometri dal centro di Urano.

Nessuno dei satelliti di Urano ha dimensioni simili a quelle dei satelliti galileiani, di Titano o della luna. Il più grande è Oberon, che ha un diametro di circa 1600 chilometri, mentre il più piccolo è Miranda, con un diametro di 240 chilometri.

A lungo parve che non ci fosse niente di particolarmente eccitante nel sistema di satelliti di Urano, ma nel 1973 un astronomo inglese, Gordon Tayler, calcolò che Urano stava per passare davanti a una stella di nona magnitudine, SA0158687; questo fatto mise in agitazione gli astronomi, perché implicava che a un certo momento, subito prima che la stella venisse occultata, la sua luce avrebbe attraversato l'atmosfera superiore del pianeta; analogamente, allorché la stella fosse riemersa da dietro il pianeta, la sua luce avrebbe di nuovo attraversato l'atmosfera superiore di Urano. La luce della stella in tali momenti avrebbe potuto fornire agli astronomi dati su temperatura, pressione e composizione dell'atmosfera di Urano. Era previsto che l'occultazione sarebbe avvenuta il 19 marzo 1977; per meglio osservarla, l'astronomo americano James L. Elliot e alcuni colleghi quella notte salirono, a bordo di un aereo, a un'altezza a cui non si risentivano più gli effetti di distorsione e di assorbimento dovuti agli strati inferiori dell'atmosfera terrestre.

Prima che Urano raggiungesse la stella, la luce di quest'ultima diminuì improvvisamente per circa 7 secondi, per poi ritornare a livello normale. Via via che Urano si avvicinava, vi furono altre quattro brevi fasi di oscuramento, ciascuna di un secondo. Quando la stella emerse dall'altra parte, si ebbe un'analoga successione di oscuramenti, ma in ordine inverso. L'unico modo di spiegare questo fenomeno era supporre l'esistenza di sottili anelli di materia intorno a Urano - anelli solitamente non visibili dalla terra, perché troppo tenui, troppo rarefatti e troppo poco luminosi.

Un'attenta osservazione di Urano durante l'occultazione di altre stelle, per esempio durante quella avvenuta il 10 aprile 1978, aveva finora mostrato l'esistenza di nove anelli. Il recente passaggio della sonda "Voyager 2" ci ha informato della presenza di 11 anelli. Quello più interno dista 40 mila chilometri dal centro del pianeta, quello più esterno 49 mila. L'intero sistema di anelli è compreso entro il limite di Roche.

Si è potuto calcolare che gli anelli di Urano sono così sottili, così rarefatti e poco splendenti da avere una luminosità pari a 1 su 3 milioni di quella degli anelli di Saturno. Non c'è da sorprendersi se gli anelli di Urano possono essere avvistati dalla terra solo nel modo indiretto sopra descritto.

Quando, in seguito, si scoprì l'esistenza dell'anello di Giove, si cominciò a pensare che dopo tutto gli anelli non dovevano essere un fenomeno così insolito. Forse tutti i giganti gassosi hanno un sistema di anelli, oltre a numerosi satelliti. Ciò che fa di Saturno un caso unico non è la presenza di anelli, ma solamente il fatto che essi siano così luminosi ed estesi.

NETTUNO.

Poco dopo la scoperta di Urano, venne calcolata la sua orbita. Con il passare degli anni, però, risultò che Urano non seguiva l'orbita che era stata calcolata - o per lo meno non esattamente. Nel 1821 l'astronomo francese Alexis Bouvard ricalcolò l'orbita del pianeta, tenendo conto delle osservazioni precedenti, per esempio di quelle di Flamsteed. Ma Urano non seguiva esattamente neppure la nuova orbita calcolata.

Le lievi attrazioni gravitazionali esercitate su Urano dagli altri pianeti ("perturbazioni") ne influenzavano leggermente il moto, così che Urano si trovava o un po' in ritardo o un po' in anticipo sulla posizione teorica che avrebbe dovuto avere. Questi effetti furono ricalcolati con cura, ma Urano seguitava a non comportarsi secondo le previsioni. La conclusione logica era che, al di là di Urano, doveva esserci un pianeta sconosciuto che esercitava un'attrazione gravitazionale di cui non si era tenuto conto.

Nel 1841 un ventiduenne studente di matematica dell'Università di Cambridge, in Inghilterra, affrontò il problema lavorandoci nel tempo libero. Il suo nome era John Couch Adams; nel settembre del 1845, il suo lavoro poteva dirsi concluso. Egli aveva calcolato dove avrebbe dovuto trovarsi il pianeta ancora sconosciuto perché, con la sua presenza, potesse spiegare le anomalie dell'orbita di Urano. Tuttavia, Adams non riuscì a suscitare l'interesse degli astronomi inglesi per il suo progetto.

Nel frattempo anche un giovane astronomo francese, Urban Jean Joseph Leverrier, stava lavorando indipendentemente allo stesso problema; egli portò a termine il suo lavoro circa sei mesi dopo Adams, arrivando a una conclusione pressoché identica. Leverrier ebbe però la fortuna di riuscire a indurre un astronomo tedesco, Johann Gottfried Galle, a controllare una determinata regione del cielo alla ricerca del pianeta sconosciuto. Fortunatamente Galle disponeva di una nuova mappa delle stelle di quella porzione del cielo. Egli iniziò la ricerca la notte del 23 settembre 1846, e stava lavorando, con il suo assistente Heinrich Ludwig D'Arrest, da meno di un'ora quando scoprì un oggetto di ottava magnitudine che non risultava dalla mappa.

Era il pianeta! e si trovava all'incirca nel punto in cui, secondo i calcoli, avrebbe dovuto trovarsi. In seguito gli fu dato il nome di Nettuno, il dio del mare (Poseidone nella mitologia greca), a causa del suo colore verdastro. Il merito della sua scoperta oggi viene ripartito equamente tra Adams e Leverrier.

Nettuno ruota intorno al sole in un'orbita di raggio pari a 4500 milioni di chilometri; si trova quindi a una distanza dal sole che è più di una volta e mezza quella di Urano, e trenta volte quella della terra. Esso compie una rivoluzione intorno al sole in 164,8 anni. Nettuno è il gemello di Urano (un po' come Venere è la gemella della terra, se non altro quanto a dimensioni). Nettuno ha un diametro di 49500 chilometri, appena un po' minore di quello di Urano; ma quest'ultimo è più denso e ha una massa superiore del 18 per cento. La massa di Nettuno è 17,2 volte quella della terra: si tratta dunque del quarto gigante gassoso che orbita intorno al sole.

Il 10 ottobre 1846, meno di tre settimane dopo che Nettuno era stato avvistato per la prima volta, fu scoperto un suo satellite, al quale venne dato il nome di un mitico figlio di Nettuno, Tritone. Si scoprì poi che anche Tritone era un satellite di grandi dimensioni, con una massa quasi uguale a quella di Titano: è stato il settimo satellite di questo tipo a essere scoperto, e il primo dopo la scoperta di Titano, avvenuta quasi due secoli prima.

Il suo diametro è di circa 3900 chilometri, il che lo rende di poco più grande della nostra luna; la sua distanza dal centro di Nettuno è di 355 mila chilometri, circa la distanza terra-luna. A

causa della maggiore attrazione gravitazionale esercitata da Nettuno, Tritone però compie una rivoluzione in 5,88 giorni, cioè circa in un quinto del tempo impiegato dalla luna per girare intorno alla terra.

Tritone gira intorno a Nettuno in senso retrogrado. Non è l'unico satellite a comportarsi così, ma gli altri (i quattro satelliti più esterni di Giove e quello più esterno di Saturno) sono tutti molto piccoli e molto distanti dal pianeta di cui sono satelliti. Tritone invece è grande ed è anche prossimo al suo pianeta. Rimane quindi un mistero perché debba seguire un'orbita retrograda.

Per più di un secolo Tritone rimase l'unico satellite di Nettuno che si conoscesse. Poi, nel 1949, Kuiper (che aveva scoperto l'anno prima Miranda) avvistò un oggetto piccolo e assai poco luminoso nelle vicinanze di Nettuno: era un altro satellite, che venne chiamato Nereide, dal nome delle ninfe marine della mitologia greca.

Nereide ha un diametro di circa 240 chilometri e compie il suo giro intorno a Nettuno in senso normale. Ha però l'orbita più eccentrica che si conosca per un satellite; nella posizione più vicina, dista da Nettuno 1400000 chilometri, mentre all'altro estremo della sua orbita è a 9700000 chilometri; in altri termini, la sua distanza da Nettuno varia di circa sette volte da un estremo all'altro. Il suo periodo di rivoluzione è di 365,21 giorni, cioè 45 minuti meno dell'anno terrestre.

Nettuno non ha ancora ricevuto la visita di una sonda, e quindi non c'è da sorprendersi se non siamo a conoscenza di altri satelliti o di un sistema di anelli. Non sappiamo neppure se Tritone abbia un'atmosfera, ma, poiché Titano ce l'ha, anch'esso potrebbe benissimo averne una.

PLUTONE.

La massa e la posizione di Nettuno spiegavano gran parte delle anomalie del moto di Urano. Ma per spiegare quelle rimanenti, alcuni astronomi pensarono che si dovesse ricercare un altro pianeta, ancora più distante di Nettuno; il più assiduo nei suoi calcoli e nella sua ricerca fu Lowell (che era diventato famoso per le sue idee sui canali di Marte).

La ricerca non fu facile. Qualsiasi pianeta al di là di Nettuno sarebbe stato così poco luminoso da confondersi nella folla delle stelle più fioche. Inoltre, si sarebbe mosso tanto lentamente da rendere difficilmente osservabile il suo cambiamento di posizione. Lowell morì, nel 1916, senza averlo ancora trovato.

Tuttavia, gli astronomi dell'osservatorio Lowell, in California, continuarono la ricerca anche dopo la sua morte. Nel 1929 un giovane astronomo, Clyde William Tombaugh, riprese tale ricerca usando un nuovo telescopio, capace di fotografare con grande risoluzione regioni relativamente ampie del cielo.

Tombaugh fece anche uso del cosiddetto "blink comparator" (comparatore a visione intermittente), uno strumento che proiettava la luce attraverso una lastra fotografica impressionata in un certo giorno e poi attraverso un'altra lastra della stessa regione del cielo impressionata alcuni giorni dopo, e così via in rapida alternanza. Le lastre erano disposte in modo che le immagini di una stessa stella nelle due lastre venissero proiettate nello stesso punto. Le vere stelle sarebbero rimaste perfettamente immobili mentre la luce passava alternativamente attraverso l'una o l'altra lastra. Qualsiasi eventuale pianeta, per quanto oscuro, avrebbe invece cambiato la sua posizione, comparendo ora qui, ora lì, alternativamente, a somiglianza di un lampeggiatore ("blink").

Anche con tale strumento la scoperta non fu semplice, perché ogni lastra conteneva molte decine di migliaia di stelle, ed era necessario esaminare attentamente ogni angolo della lastra per vedere se, in questa miriade, ve n'era una che lampeggiava.

Ma alle 4 pomeridiane del 18 febbraio 1930 Tombaugh, mentre stava studiando una regione nella costellazione dei Gemelli, trovò un "blink". Seguì il suo oggetto per circa un mese e, il 13 marzo 1930, annunciò di aver trovato il nuovo pianeta; esso venne chiamato col nome del dio degli inferi, Plutone, perché era estremamente lontano dalla luce del sole; in più, le prime due lettere del nome erano le iniziali di Percival Lowell.

Il calcolo dell'orbita di Plutone diede molte sorprese. Non era così lontano dal sole, quanto avevano pensato Lowell e altri astronomi; la sua distanza media risultò di circa 6 miliardi di chilometri, superiore solo del 30 per cento alla distanza di Nettuno.

Inoltre l'orbita era più eccentrica di quella di tutti gli altri pianeti; nel punto di maggior distanza dal sole, Plutone distava 7,4 miliardi di chilometri, mentre nel punto opposto della sua orbita, cioè in perielio, tale distanza si riduceva a 4,3 miliardi di chilometri.

Quando è alla minima distanza dal sole, Plutone gli è addirittura più vicino di Nettuno di circa 160 milioni di chilometri. Plutone percorre la sua orbita intorno al sole in 247,7 anni, ma durante ciascuna di tali rivoluzioni c'è un periodo di venti anni in cui esso si trova più vicino al sole di Nettuno, così che non è il pianeta più lontano. Si dà il caso che uno di questi periodi cada negli ultimi due decenni del ventesimo secolo: quindi, in questo momento, Plutone è più vicino al sole di quanto non lo sia Nettuno.

L'orbita di Plutone, però, non incrocia effettivamente quella di Nettuno, perché la prima è fortemente inclinata rispetto a quella degli altri pianeti. Rispetto all'orbita della terra è inclinata di circa 17,2 gradi, mentre quella di Nettuno ha solo una leggera inclinazione. Pertanto, quando le orbite di Nettuno e di Plutone si incrociano (nel senso che hanno la stessa distanza dal sole), una di esse si trova molto al di sotto dell'altra; di fatto essi non si avvicinano mai a una distanza inferiore a 2,4 miliardi di chilometri.

La cosa più problematica di Plutone era comunque la sua luminosità molto inferiore alle aspettative, che subito lo escludeva dal novero dei giganti gassosi. Se infatti Plutone avesse avuto dimensioni comparabili a quelle di Urano o di Nettuno, sarebbe stato considerevolmente più luminoso. La stima iniziale gli attribuiva un raggio prossimo a quello della terra.

Ma anche questa stima risultò eccessiva. Nel 1950 Kuiper riuscì a vedere Plutone come un piccolo disco, e, quando ne misurò l'ampiezza, ebbe l'impressione che esso potesse avere un diametro di soli 5800 chilometri, ancor meno di quello di Marte. Alcuni astronomi erano riluttanti ad accettare tale stima; ma il 28 aprile 1965 Plutone passò molto vicino a una piccola stella senza sovrapporsi ad essa; se Plutone avesse avuto dimensioni maggiori di quelle stimate da Kuiper, l'avrebbe occultata.

Era perciò chiaro che Plutone aveva dimensioni troppo piccole per esercitare un'azione sensibile sull'orbita di Urano. Se le anomalie residue nell'orbita di Urano erano dovute all'esistenza di un pianeta distante, questo pianeta non era Plutone.

Nel 1955 si notò che la luminosità di Plutone variava in modo regolare, con un ciclo di 6,4 giorni. Si suppose allora che tale fosse il periodo di rotazione di Plutone - un periodo insolitamente lungo. Mercurio e Venere hanno periodi ancora più lunghi, ma sono fortemente influenzati dagli effetti di marea provocati dal sole, a cui sono molto vicini. Ma nel caso di Plutone che giustificazione poteva avere tale fenomeno?

Poi, il 22 giugno 1978 sopraggiunse una scoperta che sembrò fornire una spiegazione. Quel giorno l'astronomo americano James W. Christy, analizzando alcune fotografie di Plutone, notò un marcato rigonfiamento da una parte. Esaminò altre fotografie e giunse alla conclusione che Plutone aveva un satellite. Un satellite molto vicino, tanto che la distanza da centro a centro era solo di 20 mila chilometri. La scoperta era giunta così tardi perché, alla distanza a cui si trova Plutone dalla terra, è assai difficile distinguere due oggetti così vicini. Christy diede al satellite il nome di Caronte, il barcaiolo che nella mitologia greca fa attraversare alle ombre dei morti il fiume Stige, al di là del quale inizia il regno di Plutone, l'Ade.

Caronte compie una rivoluzione intorno a Plutone in 6,4 giorni, che è esattamente il tempo impiegato dal pianeta per ruotare sul proprio asse. Non si tratta di una coincidenza. I due corpi devono essersi rallentati a vicenda tramite gli effetti di marea, fino ad arrivare a presentarsi reciprocamente sempre una stessa faccia; ora essi ruotano intorno al comune centro di gravità, come le due estremità di un manubrio da ginnastica tenute insieme dall'attrazione gravitazionale.

Questo è l'unico sistema pianeta-satellite che ruoti come un manubrio rigido. Considerando il caso a noi più vicino, per esempio, la luna mostra sempre la stessa faccia alla terra, ma la terra non ha ancora subìto un rallentamento tale da mostrare sempre una stessa faccia al suo satellite, perché è molto più grande e le occorre molto più tempo per subire un simile rallentamento. Se le dimensioni della terra e della luna fossero più simili tra loro, ne sarebbe potuto risultare qualcosa di analogo a quello che si verifica fra Plutone e Caronte.

In base alla distanza fra loro e al tempo di rivoluzione si può calcolare la massa totale dei due corpi, che risulta solo un ottavo circa della massa della luna. Plutone è ancora più piccolo di quanto fosse stato stimato dai più pessimisti.

In base alla luminosità relativa dei due corpi, sembra che Plutone abbia un diametro di soli 3000 chilometri, dunque dimensioni molto prossime a quelle di Europa, il più piccolo dei sette satelliti maggiori. Caronte ha un diametro di 1200 chilometri, circa la grandezza di Dione, il satellite di Saturno.

I due oggetti non hanno dunque dimensioni molto diverse. Probabilmente Plutone ha una massa che è solo dieci volte quella di Caronte, mentre la terra ha una massa che è 81 volte quella della luna. Questa differenza nelle rispettive dimensioni spiega perché Plutone e Caronte ruotano l'uno intorno all'altro presentandosi sempre la stessa faccia, mentre la terra e la luna non fanno altrettanto. Per quanto ne sappiamo, è questo il caso nel sistema solare che più si avvicina a un «pianeta doppio». Fino al 1978 si era pensato che la situazione più simile a quella di una stella doppia fosse quella della terra e della luna.

GLI ASTEROIDI.

ASTEROIDI AL DI LÀ DELL'ORBITA DI MARTE.

Ogni pianeta, con un'unica eccezione, ha una distanza dal sole compresa tra 1,3 e 2,0 volte quella del pianeta precedente. L'unica eccezione è costituita da Giove, il quinto pianeta, che dista dal sole 3,4 volte più di Marte, il quarto pianeta.

Questo singolare intervallo suscitò la perplessità degli astronomi dopo la scoperta di Urano (a quell'epoca, infatti, si sviluppò un grande interesse per la possibile esistenza di altri pianeti). Poteva forse esserci un pianeta in tale intervallo? Un pianeta intermedio tra il quarto e il quinto poteva essere sfuggito a ogni osservazione fino ad allora? Un astronomo tedesco, Heinrich W. M. Olbers, organizzò un gruppo per intraprendere una ricerca sistematica di tale pianeta.

Stavano facendo i loro preparativi, quando un astronomo italiano, Giuseppe Piazzi, che stava osservando i cieli senza minimamente pensare a un nuovo pianeta, si imbatté in un oggetto che mutava posizione di giorno in giorno. Dalla velocità del suo moto sembrava situato in una zona compresa tra Marte e Giove; e, a giudicare dalla sua scarsa luminosità, doveva essere molto piccolo. La scoperta venne fatta il primo gennaio del 1801, il primo giorno del nuovo secolo.

Le osservazioni di Piazzi permisero al matematico tedesco Johann K. F. Gauss di calcolare l'orbita dell'oggetto; si trattava effettivamente di un nuovo pianeta la cui orbita giaceva tra quelle di Marte e Giove, esattamente dove avrebbe dovuto trovarsi per rendere regolare la distribuzione dei pianeti. Piazzi, che lavorava in Sicilia, chiamò il pianeta Cerere, in onore della dea romana delle messi la cui storia mitica era intrecciata a quella dell'isola.

La distanza e la scarsa luminosità di Cerere davano un'idea delle sue dimensioni, che dovevano essere veramente piccole, molto minori di quelle di qualsiasi altro pianeta. I dati più recenti parlano di un diametro poco inferiore ai 1000 chilometri. Probabilmente la massa di Cerere è circa un cinquantesimo di quella della luna, ed è molto minore di quella di tutti i maggiori satelliti.

Non appariva possibile che Cerere fosse l'unico corpo nell'intervallo tra Marte e Giove; pertanto Olbers continuò la ricerca anche dopo la scoperta di Piazzi. Entro il 1807 infatti vennero

scoperti altri tre pianeti in quello stesso intervallo, e vennero dati loro i nomi di Pallade, Giunone e Vesta. Tutti e tre erano ancora più piccoli di Cerere: Giunone, il più piccolo di tutti, non raggiunge forse i 100 chilometri di diametro.

Questi nuovi pianeti sono talmente piccoli che neppure il miglior telescopio di quei tempi poteva farli apparire come dischetti; essi mantenevano l'aspetto di punti luminosi, come accade per le stelle. Per questa ragione Herschel propose di chiamarli "asteroidi" (oggetti simili a stelle) e il suo suggerimento fu accolto.

Si dovette aspettare il 1845 perché un astronomo tedesco, Karl L. Hencke, scoprisse un quinto asteroide, che denominò Astrea; dopo di allora, però, le scoperte si susseguirono di continuo. Oggi sono stati individuati più di 1600 asteroidi, tutti considerevolmente più piccoli di Cerere, il primo a esser stato scoperto; e indubbiamente ne restano da scoprire ancora migliaia. Essi si trovano quasi tutti nell'intervallo tra Marte e Giove, e tale intervallo oggi viene indicato con la denominazione di "fascia degli asteroidi".

A che cosa si deve l'esistenza degli asteroidi? Fin da quando furono scoperti i primi quattro, Olbers suggerì che essi fossero i resti di un pianeta esploso. Gli astronomi, però, restano dubbiosi circa questa eventualità, ritenendo più verosimile che tale pianeta non si sia mai formato: mentre in altre regioni la nebulosa originaria si è condensata gradualmente dando origine a planetesimali (equivalenti ad asteroidi) e questi ai singoli pianeti (che portano sotto forma di crateri il segno dell'impatto degli ultimi venuti), nella fascia degli asteroidi, la condensazione non ha mai superato lo stadio dei planetesimali. Si ha l'impressione che di ciò sia responsabile l'effetto perturbante del gigantesco vicino, Giove.

Nel 1866 era stato ormai scoperto un numero di asteroidi sufficiente a dimostrare che essi non erano distribuiti in modo uniforme nella fascia: esistevano regioni in cui non passava alcuna orbita. Non c'erano asteroidi alle distanze medie dal sole di 370, 440, 490 e 550 milioni di chilometri.

Un astronomo americano, Daniel Kirkwood, osservò nel 1866 che in queste orbite gli asteroidi avrebbero compiuto il loro giro intorno al sole in un periodo pari a una frazione semplice del periodo di Giove. In tali condizioni, l'effetto perturbante di Giove sarebbe stato particolarmente intenso, e qualsiasi asteroide che si trovasse a quelle distanze sarebbe stato costretto ad avvicinarsi al sole o ad allontanarsi da esso. La presenza di queste "lacune di Kirkwood" mostrava chiaramente che l'influenza di Giove era rilevante e poteva impedire la condensazione.

In seguito emerse un nesso ancora più stretto tra Giove e gli asteroidi. Nel 1906 un astronomo tedesco, Max Wolf, scoprì l'asteroide 588, che si muoveva con insolita lentezza, il che faceva pensare che fosse sorprendentemente lontano dal sole. Era, in effetti, l'asteroide più lontano mai scoperto. Gli venne dato il nome di Achille, l'eroe greco della guerra troiana. (Di solito agli asteroidi vengono dati nomi femminili, ma a quelli con orbite insolite vengono dati nomi maschili.)

Attente osservazioni mostrarono che Achille si muoveva sull'orbita di Giove, precedendolo di 60 gradi. Prima della fine di quello stesso anno fu scoperto anche l'asteroide 617, che si muove sull'orbita di Giove seguendolo alla distanza di 60 gradi; ad esso venne dato il nome di Patroclo, l'amico di Achille nell'"Iliade" di Omero. Furono poi scoperti altri asteroidi raggruppati sia intorno a Patroclo che ad Achille; a tutti vennero dati nomi di eroi della guerra troiana.

Questo fu il primo caso in cui si scoprirono degli esempi reali della stabilità che si instaura quando tre corpi sono situati ai vertici di un triangolo equilatero. Per questa ragione a tale configurazione viene dato il nome di "posizione troiana", e agli asteroidi quello di "asteroidi troiani". Achille con il suo gruppo occupa la posizione L- 4, mentre Patroclo con il suo occupa la L-5.

I satelliti più esterni di Giove, che sembrano essere frutto di una cattura, potrebbero esser stati un tempo asteroidi troiani. Anche Febea, il satellite più esterno di Saturno, e Nereide, quello più esterno di Nettuno, potrebbero essere dei satelliti catturati - il che costituirebbe un indizio che anche nella regione al di là di Giove esistono quanto meno degli asteroidi dispersi, che forse un

tempo si trovavano nella fascia degli asteroidi e poi sono stati obbligati da qualche perturbazione a spostarsi verso l'esterno, dove hanno finito per essere catturati da un pianeta.

Nel 1920, per esempio, Baade scoprì l'asteroide 944, che chiamò Hidalgo; esso, come risultò in seguito dal calcolo della sua orbita, si trova molto al di là di Giove, e si sposta con un periodo orbitale di 13,7 anni tre volte il periodo di un asteroide medio, e maggiore anche del periodo di Giove.

L'asteroide 944 ha un'eccentricità orbitale pari a 0,66, e al perielio dista dal sole non più di 305 milioni di chilometri, così che, in quella posizione, si trova decisamente entro la fascia degli asteroidi. Invece, quando è all'afelio, la sua distanza dal sole è di 1440 milioni di chilometri - pari dunque a quella di Saturno. Tuttavia la sua orbita è talmente inclinata che, quando si trova all'afelio, Hidalgo è assai al di sotto di Saturno e non corre alcun pericolo di venir catturato; però altri satelliti situati su orbite così ampie potrebbero essere più vicini a Saturno, e finire per essere catturati da quest'ultimo, o da un altro dei pianeti più esterni.

Non potrebbe darsi il caso di un asteroide soggetto a tali perturbazioni gravitazionali da aver assunto un'orbita situata sempre molto al di là della fascia di asteroidi? Nel 1977, l'astronomo americano Charles Kowall avvistò una macchia poco luminosa, che si spostava sullo sfondo stellato del cielo con una velocità pari a un terzo solamente di quella di Giove; doveva trovarsi molto al di là dell'orbita di quest'ultimo.

Kowall la seguì per vari giorni, calcolandone un'orbita approssimativa, poi cominciò a cercarla in vecchie lastre fotografiche, riuscendo a individuarla in una trentina di esse, tra cui una che risaliva al 1895; ora aveva dati sufficienti per tracciare un'orbita accurata.

Si tratta di un asteroide piuttosto grande, di circa 190 chilometri di diametro, che, quando si trova nel punto più vicino al sole, ne dista quanto Saturno, mentre, all'estremo opposto della sua orbita, dista dal sole quanto Urano. Sembra che faccia la spola tra Saturno e Urano, senza tuttavia avvicinarsi mai troppo a nessuno dei due, a causa della forte inclinazione della sua orbita.

Kowall lo chiamò Chirone, dal nome di uno dei centauri, mezzo uomo e mezzo cavallo. Il suo periodo di rivoluzione è di 50,7 anni; attualmente si trova in prossimità dell'afelio, ma fra una ventina di anni la sua distanza da noi sarà più che dimezzata, così che potremo scorgerlo più chiaramente.

«EARTH GRAZERS» E OGGETTI APOLLO.

Se esistono asteroidi che si spingono al di là dell'orbita di Giove, perché non ce ne dovrebbero essere altri, situati al di qua dell'orbita di Marte, cioè più vicini al sole?

Il primo di tali oggetti fu scoperto il 13 agosto 1898 da un astronomo tedesco, Gustav Witt. Egli individuò l'asteroide 433 e trovò che il suo periodo di rivoluzione era di soli 1,76 anni - 44 giorni meno di quello di Marte. Pertanto la sua distanza media dal sole doveva essere minore di quella di Marte. Il nuovo asteroide venne chiamato Eros. Eros, come risultò poi, ha un'eccentricità molto alta. All'afelio si trova ben dentro la fascia degli asteroidi, ma al perielio dista dal sole soltanto 170 milioni di chilometri, non molto più della terra. Dato che la sua orbita è inclinata rispetto a quella della terra, non le si avvicina tanto quanto accadrebbe se le due orbite fossero situate nello stesso piano.

Comunque, nelle posizioni più opportune sulle loro orbite, la terra ed Eros si possono trovare a una distanza di soli 22 milioni di chilometri, poco più della metà della distanza minima di Venere dalla terra, il che significa che, a parte la luna, Eros era, al tempo in cui venne scoperto, il nostro vicino più prossimo nello spazio.

Eros non è un corpo molto grande. A giudicare dai cambiamenti di luminosità ha la forma di un mattone, con un diametro medio di 16 chilometri; non per questo va preso sottogamba: se dovesse verificarsi una collisione con la terra, sarebbe una catastrofe inimmaginabile.

Nel 1931 Eros si avvicinò fino a trovarsi a soli 26 milioni di chilometri di distanza dalla terra; venne allora messo in atto un grandioso progetto astronomico per determinarne esattamente la parallasse, in modo da poter calcolare con una precisione mai raggiunta prima le varie distanze entro il sistema solare. Il progetto riuscì e i risultati ottenuti restarono i migliori, fino a quando si ricorse all'uso di segnali radar, che furono fatti riflettere su Venere.

Un asteroide che si avvicina alla terra a una distanza inferiore a quella di Venere viene detto, non senza una certa esagerazione, «Earth grazer» (che sfiora la terra). Tra il 1898 e il 1932 ne furono scoperti soltanto tre, ciascuno dei quali, però, si avvicinava alla terra meno di Eros.

Il primato fu comunque battuto dall'asteroide 1221, scoperto il 12 marzo 1932 dall'astronomo belga Eugène Delporte, il quale accertò che esso, pur avendo un'orbita molto simile a quella di Eros, poteva avvicinarsi fino a 16 milioni di chilometri dall'orbita terrestre. Delporte lo chiamò Amor, l'equivalente latino del greco Eros.

Il 24 aprile 1932, esattamente sei settimane dopo, l'astronomo tedesco Karl Reinmuth scoprì un asteroide che chiamò Apollo, perché era un altro «Earth grazer». Si tratta di un asteroide sorprendente, perché al perielio si trova a soli 96 milioni di chilometri dal sole: esso si muove non solo entro l'orbita di Marte, ma anche all'interno di quella della terra, e perfino di quella di Venere; ha però una tale eccentricità che all'afelio dista 344 milioni di chilometri dal sole, spingendosi assai più lontano di Eros; pertanto il suo periodo di rivoluzione supera di 18 giorni quello di Eros. Il 15 maggio 1932 Apollo, che ha un diametro di circa un chilometro e mezzo, arrivò a soli 11 milioni di chilometri dalla terra, meno di trenta volte la distanza della luna. Da allora, qualsiasi oggetto che si avvicini al sole più di Venere viene chiamato oggetto Apollo.

Nel febbraio del 1936 Delporte, che quattro anni prima aveva scoperto Amor, scoprì un altro «Earth grazer», che battezzò Adone. Proprio qualche giorno prima di essere localizzato, Adone era passato a soli 2,4 milioni di chilometri dalla terra, cioè a poco più di 6,3 volte la distanza della luna. Inoltre, il nuovo «Earth grazer» aveva il perielio a 66 milioni di chilometri, in prossimità dell'orbita di Mercurio: era il secondo oggetto Apollo a essere scoperto.

Nel novembre del 1937 Reinmuth (lo scopritore di Apollo) ne scoprì un terzo, cui diede il nome di Hermes. Esso era passato a soli 800 mila chilometri dalla terra, poco più del doppio della distanza della luna. Reinmuth, in base ai dati di cui disponeva, calcolò un'orbita approssimativa, dalla quale risultava che Hermes poteva passare a non più di 300 mila chilometri dalla terra (meno della distanza della luna!), qualora i due corpi si fossero trovati in particolari posizioni sulle proprie orbite. In seguito, però, di Hermes si sono perse le tracce.

Il 26 giugno 1949 Baade scoprì un oggetto Apollo ancora più insolito, con un periodo di rivoluzione di 1,12 anni e la più elevata eccentricità orbitale mai riscontrata in un asteroide: 0,827.

All'afelio esso si trova certamente compreso entro la fascia degli asteroidi tra Marte e Giove, mentre al perielio dista soli 28 milioni di chilometri dal sole - meno dunque di qualsiasi pianeta, Mercurio incluso. Baade lo battezzò col nome di Icaro, l'ardimentoso giovane della mitologia greca che, volando con le ali inventate dal padre Dedalo, si avvicinò tanto al sole che la cera, che assicurava al suo corpo le penne delle ali, si fuse ed egli precipitò e morì.

Dopo il 1949 vennero scoperti altri oggetti Apollo. Alcuni di essi hanno periodi orbitali inferiori all'anno, e almeno uno ha un'orbita tutta interna a quella della terra. Nel 1983 ne è stato scoperto uno che si avvicina al sole più di Icaro.

Alcuni astronomi stimano che nello spazio vi siano circa 750 oggetti Apollo con diametri superiori a un chilometro. Si è calcolato che, nel corso di un milione di anni, quattro oggetti Apollo di dimensioni apprezzabili colpiranno la terra, tre Venere, uno Mercurio, o Marte o la luna, mentre sette subiranno alterazioni della loro orbita tali da farli uscire definitivamente dal sistema solare. Tuttavia, il numero degli oggetti Apollo non diminuirà col tempo, anzi è probabile che altri se ne aggiungano di quando in quando, a causa di qualche perturbazione gravitazionale di oggetti situati nella fascia degli asteroidi.

LE COMETE.

Esiste un'altra classe di oggetti del sistema solare che possono, di tanto in tanto, avvicinarsi molto al sole. Essi appaiono all'occhio come oggetti di debole luminosità, dai contorni indistinti, che attraversano il cielo, come ho detto nel capitolo secondo, simili a stelle dotate di lunghe code o di una chioma al vento. E in effetti gli antichi greci li chiamarono "asteres kometai", cioè stelle chiomate, e noi oggi li chiamiamo ancora "comete".

A differenza delle stelle e dei pianeti, non sembra che le comete seguano percorsi facilmente prevedibili; sembra invece che esse vadano e vengano senza ordine e regolarità. Poiché in epoche prescientifiche la gente credeva che le stelle e i pianeti esercitassero un influsso sugli esseri umani, questo comportamento irregolare delle comete, il loro andirivieni, venne associato agli aspetti imprevisti della vita - per esempio alle catastrofi improvvise.

Fu soltanto nel 1473 che un europeo, per la prima volta, fece qualcosa di più che rabbrividire alla comparsa di una cometa nel cielo. In quell'anno, infatti, un astronomo tedesco, Regiomontano, osservò una cometa e, notte dopo notte, ne registrò la posizione rispetto alle stelle.

Nel 1532 due astronomi, l'italiano Girolamo Fracastoro e il tedesco Peter Apian, studiarono una cometa comparsa in quell'anno, e fecero notare come la sua coda puntasse sempre in direzione opposta al sole. Poi, nel 1577, comparve un'altra cometa, e Tycho Brahe, osservandola, cercò di determinarne la distanza in base alla parallasse. Se si fosse trattato di un fenomeno atmosferico, come aveva creduto Aristotele, la cometa avrebbe dovuto avere una parallasse maggiore della luna. Ma le cose non stavano così! La sua parallasse era troppo piccola per essere misurata: dunque la cometa era al di là della luna e doveva essere un oggetto astronomico.

Ma perché le comete andavano e venivano in modo così irregolare? Dopo che Isaac Newton ebbe formulato la legge di gravitazione universale, nel 1687, fu chiaro che le comete, al pari degli altri oggetti astronomici del sistema solare, dovevano subire l'attrazione gravitazionale del sole.

Nel 1682 era apparsa una cometa, ed Edmund Halley, un amico di Newton, ne aveva osservato il percorso nel cielo. Riconsiderando le registrazioni di passaggi precedenti, egli osservò che le comete del 1456, del 1531 e del 1607 avevano seguito traiettorie analoghe. Tali comete erano comparse a intervalli di settantacinque o settantasei anni.

Halley si convinse che le comete, proprio come i pianeti, girano intorno al sole, ma in orbite ellittiche estremamente allungate. Per la maggior parte del tempo esse si trovano nella parte dell'orbita vicina all'afelio, a una distanza enorme, e sono quindi troppo poco luminose e troppo lontane per essere visibili; poi percorrono velocemente la parte dell'orbita prossima al perielio, in un tempo relativamente breve. È solo durante questo breve periodo che esse sono visibili; siccome nessuno può osservarle quando si trovano nelle altre parti dell'orbita, le loro apparizioni e scomparse sembrano dettate dal capriccio.

Halley predisse che la cometa del 1682 sarebbe ritornata nel 1758. Non visse abbastanza per vederla, ma la cometa fece effettivamente ritorno e fu avvistata per la prima volta il 25 dicembre 1758. Era leggermente in ritardo, perché passando vicino a Giove era stata rallentata dall'attrazione gravitazionale di quest'ultimo. Da allora questa cometa è nota come cometa di Halley; essa fece nuovamente ritorno nel 1833 e nel 1910; e quest'anno si è rinnovato l'appuntamento. Gli astronomi, sapendo dove cercarla, hanno potuto individuarla come un oggetto estremamente fievole, ancora a grande distanza (ma in marcia di avvicinamento) già all'inizio del 1983 e, alla fine del 1985, è stato possibile osservarla anche con strumenti poco sofisticati.

Sono state calcolate le traiettorie di diverse altre comete a breve periodo, le cui orbite sono all'interno del sistema planetario. La cometa di Halley al perielio dista soltanto 87,8 milioni di chilometri dal sole ed è quindi ben all'interno dell'orbita di Venere.

All'afelio, essa è a cinque miliardi e 280 milioni di chilometri dal sole e si trova al di là dell'orbita di Nettuno.

La cometa con l'orbita più piccola è quella di Encke, che compie un giro completo intorno al sole in 3,3 anni. Al perielio, essa dista 50 milioni di chilometri dal sole (poco meno di Mercurio). All'afelio, essa è a 611 milioni di chilometri dal sole e si trova entro il confine esterno della fascia degli asteroidi. La cometa di Encke è l'unica (a noi nota) la cui traiettoria sia tutta interna all'orbita di Giove.

Le comete a lungo periodo, invece, hanno il loro afelio molto al di là del sistema planetario e ritornano all'interno del sistema solare solo a intervalli dell'ordine di milioni di anni. Nel 1973 l'astronomo ceco Lajos Kohoutek scoprì una nuova cometa che suscitò un'ondata di interesse perché prometteva di essere eccezionalmente luminosa (ma non lo fu). Al perielio essa si trovava a soli 37,5 milioni di chilometri dal sole - dunque più vicina di Mercurio; ma all'afelio, se il calcolo dell'orbita è corretto, essa si allontana dal sole fino a circa 500 miliardi di chilometri, cioè a 120 volte la distanza di Nettuno. La cometa di Kohoutek dovrebbe compiere una rivoluzione completa intorno al sole in 217 mila anni. Indubbiamente esistono altre comete dall'orbita ancora più estesa.

Nel 1950 Oort suggerì che in una regione che si estende da 6000 a 12 mila miliardi di chilometri di distanza dal sole (fino a 25 volte la distanza della cometa di Kohoutek all'afelio) esistano cento miliardi di piccoli corpi aventi un diametro perlopiù compreso tra 0,8 e 8 chilometri. Presi tutti insieme avrebbero una massa non superiore a un ottavo di quella della terra.

Questo materiale costituisce la "nube di Oort", un residuo della nube originaria di polvere e gas che si sarebbe condensata circa 5 miliardi di anni fa formando il sistema solare. La differenza tra comete e asteroidi sta nel fatto che, mentre questi ultimi hanno natura rocciosa, le prime sono fatte soprattutto di materiali congelati, che, alla loro distanza ordinaria dal sole, sono solidi come la roccia, ma evaporano facilmente non appena si avvicinano a una fonte di calore.

(L'astronomo americano Fred Lawrence Whipple aveva suggerito per primo, nel 1949, che le comete fossero essenzialmente oggetti ghiacciati, dotati eventualmente di un nucleo di materiale roccioso, oppure ricchi di granelli di pietra distribuiti uniformemente nella loro massa. Questa teoria viene comunemente chiamata "teoria della palla di neve sporca".)

Normalmente le comete se ne stanno nelle loro orbite remote, compiendo lentamente il loro giro intorno al sole lontano, con periodi di rivoluzione dell'ordine di milioni di anni. Di quando in quando, però, a causa di una collisione o dell'azione gravitazionale di qualche stella delle più prossime, alcune di esse vengono accelerate nel loro lentissimo moto di rivoluzione intorno al sole e abbandonano definitivamente il sistema solare. Altre invece vengono rallentate e si avvicinano al sole, gli girano intorno e ritornano alla loro posizione originaria, per poi ridiscendere nuovamente. Sono queste le comete che possono essere avvistate quando (e se) penetrano all'interno del sistema planetario e passano vicino alla terra.

Dato che le comete provengono da un guscio sferico, possono penetrare nel sistema solare da qualsiasi direzione e hanno la stessa probabilità di muoversi con moto retrogrado o diretto. Per esempio, la cometa di Halley si muove in senso retrogrado.

Una volta che una cometa è penetrata nelle regioni interne del sistema solare, il calore del sole fa evaporare i materiali ghiacciati che la compongono, e le particelle di polvere intrappolate nel ghiaccio vengono liberate. Vapore e polvere formano una specie di involucro nebuloso intorno alla cometa (la "chioma") dandole l'aspetto di un grande oggetto dai contorni sfumati.

Così la cometa di Halley, quando è completamente congelata, può avere un diametro di soli 2,5 chilometri circa. Quando invece essa passa vicino al sole, l'involucro di vapori che le si forma tutt'attorno può avere anche 400 mila chilometri di diametro, raggiungendo un volume che supera di più di venti volte quello del gigantesco Giove - ma la materia che forma questo involucro è a tal punto rarefatta da potersi definire un «vuoto nebbioso».

Il sole emette delle particelle piccolissime, ancora più piccole degli atomi (ne parleremo nel capitolo settimo), che vengono proiettate tutt'attorno in ogni direzione. Questo "vento solare" soffia sulla nebulosità che circonda la cometa, facendole assumere l'aspetto di una lunga coda, che può essere più voluminosa dello stesso sole, ma nella quale la materia è ancora più rarefatta.

Naturalmente questa coda deve necessariamente essere sempre diretta in senso opposto al sole, come già quattro secoli e mezzo orsono avevano notato Fracastoro e Apian. Ogni volta che passa vicino al sole, una cometa perde parte del proprio materiale che evapora e va a formare la coda. Alla fine, dopo circa duecento passaggi, la cometa si frantuma riducendosi in polvere e scompare, oppure lascia come residuo un nucleo roccioso (come sta facendo la cometa di Encke) che finirà per apparire niente più che un asteroide.

Nella lunga storia del sistema solare molti milioni di comete hanno subìto la sorte di venir accelerate abbandonando il sistema stesso, o di venir rallentate cadendo al suo interno, dove prima o poi incontrano la fine. Ciononostante, ne rimangono ancora parecchi miliardi: non corriamo certo il pericolo di restar sprovvisti di comete.

Capitolo 4.
LA TERRA.

FORMA E DIMENSIONI.

Il sistema solare comprende un enorme sole, quattro pianeti giganti, cinque pianeti più piccoli, più di quaranta satelliti, più di centomila asteroidi, e forse oltre un centinaio di miliardi di comete; eppure, per quanto ne sappiamo oggi, su uno solo di tutti questi corpi esiste la vita: sulla nostra terra. È dunque giunto il momento di occuparci di quest'ultima.

LA TERRA È UNA SFERA.

Una delle più importanti intuizioni che ebbero gli antichi greci fu la loro convinzione che la terra avesse la forma di una sfera. In origine concepirono tale idea (di cui la tradizione attribuisce il merito a Pitagora, che per primo l'avrebbe suggerita circa nel 525 avanti Cristo) in base ad argomentazioni di carattere filosofico, per esempio quella che una sfera costituisce la forma perfetta. I greci, però, vollero anche verificare tale idea con l'osservazione. Verso il 350 avanti Cristo Aristotele elencò tutta una serie di prove che dimostravano che la terra non è piatta, ma rotonda. Il suo argomento più convincente si basava sul fatto che, quando ci si sposta verso nord o verso sud, si vedono apparire di fronte a noi nuove stelle sopra l'orizzonte, mentre parte di quelle prima visibili scompaiono sotto l'orizzonte alle nostre spalle. Vi era poi il fatto che osservando le navi che si allontanavano, qualunque fosse la loro direzione, lo scafo scompariva sempre prima della velatura. E infine la constatazione che, durante un'eclissi lunare, l'ombra della terra sulla luna era sempre un cerchio, a prescindere dalla posizione della luna stessa. Queste due ultime osservazioni potevano spiegarsi solo ammettendo la conformazione sferica della terra.

Almeno tra gli studiosi, l'idea di una terra sferica non tramontò mai del tutto, neppure durante i secoli bui del Medioevo. Dante Alighieri, in quel compendio delle concezioni medioevali che è la "Divina Commedia", partiva dal presupposto che la terra fosse sferica. La situazione era completamente diversa circa l'ipotesi che la sfera fosse "in rotazione". Già nel 350 avanti Cristo il filosofo greco Eraclide di Ponto aveva sostenuto che era molto più facile supporre che la terra ruotasse sul proprio asse, piuttosto che pensare che l'intera volta dei cieli ruotasse intorno alla terra. Tuttavia la maggior parte degli studiosi antichi e medioevali si rifiutò di accettare quest'idea, e ancora nel 1632 Galileo veniva condannato dall'Inquisizione romana e obbligato ad abiurare la sua credenza nel moto della terra.

Comunque, la teoria copernicana rese completamente illogica l'idea di una terra ferma, e lentamente il fatto che essa ruotasse venne accettato da tutti. Fu solo nel 1851, però, che tale rotazione fu veramente dimostrata in modo sperimentale. In quell'anno il fisico francese Jean Bernard Léon Foucault appese un enorme pendolo alla cupola di una chiesa parigina e lo fece

oscillare. Secondo le teorie fisiche accettate, questo pendolo doveva oscillare in un piano fisso, a prescindere dalla rotazione della terra. Al polo nord, per esempio, il pendolo avrebbe oscillato in un piano fisso, mentre la terra sotto di lui avrebbe compiuto una rotazione in ventiquattro ore, in senso antiorario. Un osservatore (che, essendo trascinato dalla terra, l'avrebbe giudicata immobile) avrebbe avuto l'impressione che il piano di oscillazione del pendolo girasse in senso orario, compiendo un'intera rivoluzione ogni ventiquattro ore. Al polo sud l'esperienza sarebbe stata identica, salvo che il piano di oscillazione del pendolo avrebbe dato l'impressione di ruotare in senso antiorario.

A latitudini inferiori rispetto ai poli, il piano del pendolo avrebbe ancora ruotato (in senso orario nell'emisfero settentrionale e in senso antiorario in quello meridionale), ma impiegando periodi sempre maggiori via via che ci si fosse allontanati dai poli. All'equatore il piano di oscillazione del pendolo non avrebbe dovuto subire alcuna alterazione.

Durante l'esperimento di Foucault il piano di oscillazione del pendolo ruotò nella direzione giusta e con la velocità prevista; gli osservatori poterono vedere con i propri occhi, per così dire, la terra che ruotava sotto il pendolo.

La rotazione della terra comporta molte conseguenze. La superficie si muove più rapidamente all'equatore, dove deve descrivere 40 mila chilometri di circonferenza in ventiquattro ore, e ha una velocità di poco superiore ai 1600 chilometri all'ora. Più a nord (o più a sud) dell'equatore un punto della superficie terrestre viaggia più lentamente, perché deve descrivere nelle stesse ventiquattro ore una circonferenza minore. Vicino ai poli tale circonferenza è davvero piccola; ai poli, poi, la superficie è immobile.

L'aria partecipa del moto della superficie terrestre sottostante. Se una massa di aria si sposta dall'equatore verso nord, la sua velocità (che è pari a quella dell'equatore) risulta maggiore della velocità della regione della superficie terrestre verso cui si dirige; essa sopravanza la superficie nel suo viaggio da ovest verso est, e quindi devia verso est; questa deriva è un esempio dell'"effetto Coriolis", che prende il nome dal matematico francese Gaspard Gustave de Coriolis, che lo studiò per primo nel 1835.

L'azione della forza di Coriolis sulle masse di aria imprime loro una torsione in senso orario nell'emisfero settentrionale, mentre in quello meridionale si ha un risultato inverso: la torsione è in senso antiorario. In entrambi i casi si producono delle "perturbazioni cicloniche". Tali tempeste che coinvolgono grandi masse d'aria vengono chiamate "uragani" nell'Atlantico del Nord e "tifoni" nel Pacifico del Nord. Tempeste di questo tipo, più piccole ma più intense, sono i "cicloni o tornado". Siffatte violente perturbazioni, in mare, fanno insorgere terribili "trombe marine".

Tuttavia, la conseguenza più interessante deducibile dalla rotazione terrestre era stata ricavata due secoli prima dell'esperimento di Foucault, ai tempi di Isaac Newton. A quell'epoca la concezione della terra come sfera perfetta dominava da quasi duemila anni, ma Newton si chiese che effetti potesse avere la rotazione su una simile sfera, e in particolare quali conseguenze derivassero dalla differente velocità con cui la superficie terrestre si doveva muovere alle varie latitudini.

Quanto maggiore è la velocità di rotazione tanto più forte è l'effetto centrifugo - cioè la tendenza della materia ad allontanarsi dal centro di rotazione. Ne consegue che la forza centrifuga cresce costantemente, da zero ai poli, che sono immobili, a un massimo, sulla fascia equatoriale, soggetta a un rapido moto. La terra doveva quindi essersi rigonfiata intorno alla sua zona centrale: in altre parole, doveva essere uno "sferoide schiacciato", con un "rigonfiamento equatoriale" e uno schiacciamento ai poli. Doveva avere approssimativamente la forma di un mandarino piuttosto che quella di una palla da golf. Newton calcolò perfino che lo schiacciamento polare doveva essere circa 1 su 230 del diametro totale, risultato sorprendentemente vicino alla realtà.

La terra ruota così lentamente che lo schiacciamento e il rigonfiamento sono troppo piccoli per essere rilevati facilmente. Ma almeno due osservazioni astronomiche confermavano il

ragionamento di Newton, fin dai suoi tempi. La prima era che anche Giove e Saturno erano visibilmente schiacciati ai poli, come ho già osservato nel capitolo precedente.

La seconda era che, se la terra presentava veramente un rigonfiamento all'equatore, la variazione della forza gravitazionale esercitata su tale zona dalla luna, che in genere si trova, durante il suo percorso intorno alla terra, a nord o a sud dell'equatore, avrebbe portato l'asse di rotazione terrestre a descrivere un doppio cono, mentre ciascuno dei poli sarebbe stato orientato verso punti sempre diversi del cielo; l'insieme di tali punti avrebbe dovuto formare un cerchio, lungo il quale il polo avrebbe dovuto compiere una rivoluzione completa ogni 25750 anni. In realtà, Ipparco aveva notato questo spostamento circa nel 150 avanti Cristo, quando aveva confrontato le posizioni delle stelle ai suoi tempi con quelle registrate un secolo e mezzo prima. Per effetto dello spostamento dell'asse terrestre il sole raggiunge il punto dell'equinozio ogni anno circa 50 secondi di arco più a est (cioè nella direzione del mattino). Poiché ne consegue che ogni anno l'equinozio si verifica in un punto più arretrato (e quindi prima nel tempo) rispetto a quello dell'anno precedente, Ipparco denominò questo fenomeno "precessione degli equinozi", denominazione rimasta ancora oggi.

Naturalmente gli scienziati si misero alla ricerca di prove più dirette della deformazione della terra. Essi fecero ricorso alla trigonometria, un metodo classico per la soluzione dei problemi geometrici: su una superficie curva la somma degli angoli di un triangolo è maggiore di 180 gradi. Quanto maggiore è la curvatura, tanto più tale somma supera i 180 gradi. Ora, se la terra fosse stata uno sferoide schiacciato, come aveva affermato Newton, la somma sarebbe stata più elevata sulla superficie equatoriale, dotata di una curvatura maggiore, che ai poli, dove la curvatura è inferiore. Negli anni successivi al 1730 gli scienziati francesi effettuarono la prima verifica, tramite rilevamenti su vasta scala in luoghi distanti del nord e del sud della Francia, con il risultato che l'astronomo francese Jacques Cassini (figlio dell'astronomo che aveva notato lo schiacciamento di Giove e Saturno) stabilì che la terra presentava un rigonfiamento ai poli e non all'equatore! Ricorrendo a un'analogia esagerata, la sua forma sarebbe quindi stata più simile a quella di un cetriolo che a quella di un mandarino.

Ma la differenza di curvatura tra il nord e il sud della Francia era ovviamente troppo piccola per dare dei risultati conclusivi. Di conseguenza nel 1735 e nel 1736 due spedizioni francesi raggiunsero regioni molto più distanti tra loro, recandosi l'una in Perù, vicino all'equatore, e l'altra in Lapponia, nella zona artica. Nel 1744 i loro rilevamenti avevano dato una risposta chiara: la terra è nettamente più curva in Perù che in Lapponia.

Oggi le migliori misurazioni mostrano che il diametro equatoriale della terra è superiore di 43 chilometri al diametro polare (12756 chilometri rispetto a 12713 chilometri).

Le ricerche del diciottesimo secolo sulla forma della terra fecero insorgere nella comunità scientifica un senso di insoddisfazione per lo stato delle tecniche di misurazione. Non esistevano campioni adeguati per misure di precisione. Questa insoddisfazione fu in parte responsabile dell'adozione, avvenuta mezzo secolo dopo, durante la Rivoluzione francese, del "sistema metrico", un sistema logico ed elaborato in modo scientifico, che si basava sul metro. Il sistema metrico oggi viene usato dagli scienziati di tutto il mondo con piena soddisfazione, ed è il sistema adottato in modo ufficiale praticamente in tutti i paesi, salvo gli Stati Uniti.

L'importanza di precisi campioni delle unità di misura non può essere sopravvalutata. Una buona percentuale degli sforzi scientifici viene continuamente dedicata al miglioramento di tali campioni. Il metro campione e il chilogrammo campione furono costruiti in una lega di platino-iridio (virtualmente immune da alterazioni chimiche), e vennero depositati a Sèvres, un sobborgo di Parigi, in condizioni accuratamente controllate, soprattutto a temperatura costante per evitare ogni dilatazione o contrazione.

Nuove leghe, come l'Invar (abbreviazione di «invariabile»), composta di nichel e ferro in determinate proporzioni, si rivelarono praticamente insensibili a qualsiasi cambiamento di temperatura. Si poterono usare tali leghe per costruire migliori campioni di lunghezza; per i suoi

studi sull'Invar, il fisico francese di origine svizzera Charles Edouard Guillaume ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1920.

Tuttavia, nel 1960 la comunità scientifica abbandonò i campioni di lunghezza fino ad allora accettati. La Conferenza generale di pesi e misure ha adottato come campione la piccolissima lunghezza di un'onda luminosa emessa da una data varietà del gas raro cripto. Per la precisione, 1650763,73 di queste onde (immutabili più di qualsiasi cosa fabbricata dall'uomo) sono pari a 1 metro; in tal modo l'unità di lunghezza è definita oggi con una precisione mille volte maggiore di quanto non fosse in precedenza. Nel 1984 il metro è stato messo in relazione con la velocità della luce, quale spazio percorso dalla luce in una data frazione di secondo.

MISURAZIONI DEL GEOIDE.

La forma della terra a livello del mare, considerata come priva di irregolarità, viene chiamata "geoide". Naturalmente la superficie reale della terra è piena di irregolarità - montagne, burroni eccetera. Anche prima che Newton sollevasse la questione della forma generale del pianeta, gli scienziati avevano cercato di misurare la grandezza di queste deviazioni di minor conto dalla forma sferica perfetta (che essi credevano caratterizzasse la terra), ricorrendo all'aiuto di un pendolo. Galileo, nel 1581, quando aveva solo diciassette anni, aveva scoperto che un pendolo di una data lunghezza compiva un'oscillazione sempre in uno stesso tempo, indipendentemente dall'ampiezza dell'oscillazione stessa; la tradizione vuole che egli facesse questa scoperta osservando l'oscillazione dei lampadari del duomo di Pisa durante le funzioni religiose. Esiste ancora oggi nella cattedrale pisana una lampada chiamata "lampada di Galileo", ma vi fu appesa solo nel 1584. Huygens applicò un pendolo agli ingranaggi di un orologio, in modo che la costanza del moto del pendolo facesse funzionare l'orologio con altrettanta precisione. Nel 1656 Huygens ideò così il primo orologio moderno - la cosiddetta "pendola" - rendendo in un solo colpo dieci volte più precisa la misurazione del tempo.

Il periodo del pendolo dipende tanto dalla sua lunghezza quanto dalla forza gravitazionale; al livello del mare un pendolo della lunghezza di 0,993 metri compie un'oscillazione semplice esattamente in un secondo, fatto questo scoperto nel 1644 da un allievo di Galileo, il matematico francese Marin Mersenne. Gli studiosi che indagavano sulle irregolarità della superficie terrestre ricorsero al fatto che il periodo di oscillazione di un pendolo dipende dall'intensità della forza di gravità in ogni punto dato: per esempio, un pendolo che al livello del mare «batte» esattamente il secondo, portato in cima a una montagna metterà un po' più di un secondo per compiere un'oscillazione, perché la cima del monte è più distante dal centro della terra e quindi la gravità è leggermente meno intensa.

Nel 1673 una spedizione francese diretta verso la costa settentrionale del Sudamerica (vicino all'equatore) scoprì che a quella latitudine il pendolo risultava rallentato anche a livello del mare. Newton più tardi considerò questo risultato come prova dell'esistenza del rigonfiamento equatoriale, che, provocando una maggior distanza dal centro della terra, ridurrebbe la forza di gravità. Dopo che le spedizioni in Perù e in Lapponia ebbero confermato la teoria di Newton, un membro della spedizione in Lapponia, il matematico francese Alexis Claude Clairaut, elaborò dei metodi per calcolare lo schiacciamento della terra in base alle oscillazioni di un pendolo. In tal modo divenne possibile determinare la forma esatta del geoide, cioè la forma della terra al livello del mare; si è trovato che essa non si discosta in nessun punto per più di 90 metri da quella di uno sferoide schiacciato ideale. Oggi la forza gravitazionale viene misurata anche mediante il "gravimetro", strumento che consiste in un corpo pesante appeso a una molla molto sensibile. La posizione del peso rispetto a una scala graduata indica la forza con cui esso viene attratto verso il basso, e fornisce quindi una misura di estrema precisione delle variazioni della gravità.

Al livello del mare la gravità varia dello 0,6 per cento circa, essendo, naturalmente, meno intensa all'equatore. Nella vita ordinaria tale differenza non è percepibile, ma può influire sui livelli

dei primati durante le gare sportive. Le prestazioni degli atleti alle Olimpiadi dipendono in una certa misura dalla latitudine (e dall'altitudine) della città in cui si svolgono i giochi.

Una rigorosa conoscenza della forma del geoide è indispensabile per poter realizzare mappe accurate. Ancora negli anni cinquanta esisteva una carta precisa solo del 7 per cento della superficie delle terre emerse. La distanza tra New York e Londra, per esempio, era nota solo con l'approssimazione di circa due chilometri, mentre la collocazione di certe isole del Pacifico era nota solo con un'approssimazione di parecchi chilometri. In questi tempi in cui si viaggia in aereo e in cui, ahimè, esiste l'eventualità di lanci di missili, questo margine di errore è tutt'altro che trascurabile. Ma oggi è ormai possibile tracciare carte geografiche veramente accurate - cosa strana - non già mediante rilevamenti della superficie terrestre, ma ricorrendo a misurazioni astronomiche di un genere nuovo. Il primo strumento realizzato per tale scopo fu il satellite artificiale "Vanguard Primo", lanciato dagli Stati Uniti il 17 marzo 1958, che compiva la sua rivoluzione intorno alla terra in un periodo di due ore e mezzo, e che, nel corso dei primi due anni di vita, aveva già compiuto un numero di rivoluzioni superiore a quello delle rivoluzioni compiute dalla luna fin da quando si è cominciato ad osservarla con il telescopio. In base alle osservazioni delle posizioni di "Vanguard Primo" in determinati istanti da determinati punti della terra, era possibile calcolare precisamente le distanze tra questi punti di osservazione. In tal modo nel 1959 posizioni e distanze fino ad allora conosciute con un margine di errore dell'ordine dei chilometri poterono esser determinate con un'approssimazione dell'ordine di un centinaio di metri. Un altro satellite, il "Transit I-B", lanciato dagli Stati Uniti il 13 aprile 1960, è stato il primo di una serie destinata a determinare in modo sistematico le posizioni di vari punti della superficie terrestre, per migliorare e semplificare la navigazione aerea e marittima.

Come la luna, anche "Vanguard Primo" descrive intorno alla terra un'ellisse che non giace nel piano equatoriale terrestre; e, sempre come accade per la luna, anche il perigeo di "Vanguard Primo" subisce un continuo spostamento a causa della attrazione gravitazionale esercitata dal rigonfiamento equatoriale. Essendo però "Vanguard Primo" molto più piccolo della luna e molto più vicino al rigonfiamento, esso ne risente in misura maggiore; dato poi l'alto numero delle sue rivoluzioni, l'effetto del rigonfiamento equatoriale può essere studiato molto accuratamente. Nel 1959 si era ormai certi che lo spostamento del perigeo di "Vanguard Primo" non era lo stesso nell'emisfero settentrionale e in quello meridionale, il che indicava che il rigonfiamento non era del tutto simmetrico rispetto al piano equatoriale. Esso appariva 7,6 metri più spesso (cioè 7,6 metri più distante dal centro della terra) nei punti a sud dell'equatore rispetto ai punti a nord dell'equatore. Ulteriori calcoli mostrarono che il polo sud si trova 15 metri più vicino al centro della terra del polo nord (naturalmente il calcolo si riferisce al livello del mare).

Ulteriori informazioni ottenute nel 1961 in base alle orbite di "Vanguard Primo" e "Vanguard Secondo" (quest'ultimo lanciato il 17 febbraio 1959) indicano che l'equatore, al livello del mare, non è un cerchio perfetto: il diametro equatoriale in certi punti è oltre 400 metri più lungo che in altri.

Articoli giornalistici hanno parlato di una terra «a forma di pera» e di un equatore «ovale». In realtà queste deviazioni da una curvatura perfettamente regolare sono rilevabili solo con misurazioni sofisticatissime. Guardando la terra dallo spazio non si vedrebbe certo qualcosa di simile a una pera o a un uovo, bensì una sfera apparentemente perfetta. Inoltre, studi particolareggiati del geoide hanno mostrato un numero così grande di regioni leggermente prominenti o leggermente appiattite che, se proprio si volesse dare una descrizione a effetto della terra, la si potrebbe semmai definire come «bernoccoluta».

Infine, i satelliti hanno consentito di disegnare carte geografiche del mondo intero con un'approssimazione di pochi metri, grazie anche a metodi diretti come quello di fotografare in dettaglio la superficie terrestre.

Gli aerei e le navi, che erano soliti determinare la propria posizione riferendosi alle stelle, possono ora farlo riferendosi ai segnali emessi dai "satelliti per la navigazione" - senza dipendere

dalle condizioni atmosferiche, dato che le microonde penetrano anche attraverso le nubi e la nebbia. Anche i sottomarini in immersione possono ricorrere a tali segnali. Questo sistema permette una tal precisione che da bordo di un transatlantico si può calcolare la differenza di posizione tra il ponte e la stiva.

Il peso della terra.

Conoscendo esattamente le dimensioni e la forma della terra se ne può calcolare il volume, circa 1083 miliardi di chilometri cubi. Il calcolo della massa della terra, invece, è più complesso, ma la legge di gravitazione di Newton ci permette di affrontare il problema. Secondo Newton, la "forza gravitazionale" (f) tra due oggetti qualsiasi dell'universo si può esprimere nel seguente modo:

f = G per m1 per m2 fratto d al quadrato.

dove m1 ed m2 sono le masse dei due corpi in questione, d la loro distanza da centro a centro. Quanto a G, essa rappresenta la "costante gravitazionale".

Newton non poteva dire quale fosse il valore di tale costante.

Tuttavia, se conosciamo i valori delle altre grandezze che compaiono nell'equazione, possiamo trovare G; infatti, risolvendo rispetto a G, otteniamo:

G = f per d al quadrato fratto m1 per m2

Pertanto, per trovare il valore di G, basta misurare la forza gravitazionale che agisce tra due corpi di massa nota, che si trovino a una distanza nota. Il problema è che la forza gravitazionale è la più debole forza che conosciamo, così che è quasi impossibile misurare l'attrazione gravitazionale tra due masse di dimensioni ordinarie, cioè che siamo in grado di maneggiare.

Nonostante ciò, nel 1798 il fisico inglese Henry Cavendish, uomo geniale, ricco e nevrotico, che visse e morì in un isolamento quasi totale, ma ciò nonostante effettuò alcuni dei più abili esperimenti della storia della scienza, riuscì a eseguire tale misurazione.

Cavendish attaccò una sfera di massa nota a ciascuna estremità di una lunga asta e sospese a un sottile filo questa sorta di strano manubrio da ginnastica. Poi pose una palla più grande, sempre di massa nota, in prossimità di ciascuna delle sfere attaccate alle estremità dell'asta, da parti opposte, in modo che l'attrazione gravitazionale agente tra le palle grandi fisse e quelle piccole sospese facesse ruotare l'asta, appesa in posizione orizzontale, causando una torsione del filo di sospensione. Il manubrio subì effettivamente una piccola rotazione.

Ora Cavendish misurò quale forza fosse necessaria per provocare quella data torsione del filo, ricavando così il valore di f. Già conosceva m1 ed m2, le masse delle sfere, e d, la distanza fra esse; poté quindi calcolare il valore di G. Una volta ottenuto tale valore, fu in grado di calcolare la massa della terra, perché è facile misurare l'attrazione gravitazionale (f) esercitata dalla terra su di un corpo qualsiasi dato. Fu così che Cavendish per la prima volta «pesò» la terra.

Da quel tempo le misurazioni sono state grandemente perfezionate. Nel 1928, il fisico americano Paul R. Heyl del Bureau of Standards degli Stati Uniti stabilì che il valore di G è di 0,00000006673 dine per centimetro quadrato diviso grammo al quadrato - valore che fu poi ulteriormente precisato e fissato pari a 0,000000066726. Non sono tanto importanti le unità di misura, ma l'esiguità del valore numerico. Esso dà un'idea precisa della modesta intensità della forza gravitazionale. Due pesi da un chilogrammo posti alla distanza di un metro si attraggono tra loro con una forza di pochi miliardesimi di grammo.

Il fatto che la terra attragga questo stesso peso con una forza di un chilogrammo anche a una distanza di circa 6370 chilometri dal suo centro fa capire quanto grande debba essere la massa della terra. In effetti essa risulta pari a 5 976 000 000 000 000 000 000 000 chilogrammi.

Conoscendo la massa e il volume della terra è facile calcolarne la densità media. Essa risulta pari a 5,518 grammi per centimetro cubo (cioè 5,518 volte la densità dell'acqua). La densità media delle rocce superficiali della terra è di soli 2,8 grammi per centimetro cubo; pertanto la densità all'interno deve essere molto maggiore. Viene da domandarsi se essa cresca con gradualità via via che ci si avvicina al centro. La prima prova contro tale ipotesi venne dallo studio dei terremoti, che mostrò che la terra è fatta invece di una serie di strati distinti.

STRUTTURA DELLA TERRA.

I TERREMOTI.

Non sono molti i disastri naturali capaci di uccidere in pochi minuti centinaia di migliaia di persone. Tra questi, il più comune è il terremoto.

La terra subisce un milione di scosse all'anno; di esse, almeno un centinaio sono scosse serie e una decina terremoti disastrosi. Il terremoto che ha ucciso più persone è probabilmente quello avvenuto nel 1556 nella provincia settentrionale dello Shensi, in Cina: in esso morirono 830 mila persone. Altri terremoti quasi altrettanto terribili sono avvenuti in Estremo Oriente. Il 30 dicembre 1703 un terremoto uccise 200 mila persone a Tokyo, in Giappone, e l'11 ottobre 1737 un altro ne uccise 300 mila a Calcutta, in India.

A quei tempi, però, mentre la scienza si stava sviluppando nell'Europa occidentale, si prestava poca attenzione agli eventi che si svolgevano dalla parte opposta del mondo. Ma poi si verificò una catastrofe molto più vicina.

Il primo novembre 1755 un grande terremoto, forse il più violento dei tempi moderni, colpì la città di Lisbona, demolendo completamente tutte le case della parte bassa della città. Poi dall'oceano si levò quella che viene chiamata un'onda di maremoto. Seguirono altre due scosse, e scoppiarono degli incendi. Morirono sessantamila persone, e la città fu ridotta a uno scenario di devastazione.

La scossa venne avvertita su un'area di quattro milioni di chilometri quadrati, e in Marocco produsse danni gravi quanto in Portogallo. Era il giorno di Ognissanti, perciò la gente era in chiesa, e si dice che in tutta l'Europa meridionale nelle cattedrali le folle videro danzare e oscillare i lampadari.

Il disastro di Lisbona impressionò molto gli studiosi di quel tempo: era un'epoca di ottimismo, in cui molti pensatori ritenevano che la nuova scienza di Galileo e di Newton avrebbe dato agli esseri umani la possibilità di trasformare la terra in un paradiso. Questa sciagura mostrava che esistevano ancora forze titaniche, imprevedibili, e palesemente ostili, che sfuggivano al controllo umano. Il terremoto ispirò al grande scrittore Voltaire la famosa satira pessimistica "Candido", con il suo ritornello ironico che tutto va per il meglio, in questo che è il migliore dei mondi possibili.

Di solito pensiamo che sia solo la terraferma a tremare dando origine a un terremoto; ma anche la terra situata al di sotto del fondale degli oceani può mettersi a tremare, con effetti ancor più devastanti.

Questa vibrazione suscita nell'oceano delle onde lunghe e non troppo violente, che però, raggiungendo i bassi fondali in vicinanza delle coste - particolarmente se vengono sospinte entro gli spazi limitati di un porto -, si innalzano formando delle muraglie di acqua, alte talvolta fino a una trentina di metri. Se simili ondate colpiscono improvvisamente, possono causare l'annegamento di migliaia di persone.

Le onde di maremoto oggi vengono talvolta indicate, soprattutto nel Pacifico, con un nome giapponese, "tsunami" («onda di porto»): la costa giapponese è particolarmente esposta a questo fenomeno, il che giustifica l'adozione di questo termine.

Dopo il disastro di Lisbona, che era stato aggravato appunto da un'onda di maremoto o "tsunami", gli scienziati cominciarono a riflettere seriamente sulle possibili cause dei terremoti. La migliore teoria degli antichi greci (tralasciando la credenza che i sismi fossero causati da furiosi contorcimenti di giganti imprigionati sottoterra) era stata quella di Aristotele, che aveva pensato che essi fossero provocati da masse d'aria imprigionate sottoterra, che cercavano uno sfogo all'esterno. Gli scienziati dell'epoca moderna, a loro volta, sospettarono che i terremoti potessero essere l'effetto del calore interno della terra sulle tensioni intrinseche alla roccia solida.

Nel 1760, il geologo inglese John Michell (il quale aveva studiato le forze implicate nel fenomeno della "torsione", cui poi aveva fatto ricorso Cavendish per misurare la massa della terra) interpretò i terremoti come onde originate dagli spostamenti di masse rocciose chilometri al di sotto della superficie; fu sempre Michell il primo a ipotizzare che gli tsunami fossero conseguenze di terremoti sui fondali marini.

Per studiare adeguatamente i terremoti si doveva ideare uno strumento di rilevazione e di misurazione delle scosse, ma questo si verificò solamente un secolo dopo il terremoto di Lisbona. Nel 1855 il fisico italiano Luigi Palmieri ideò il primo "sismografo" (cioè strumento per registrare i terremoti, dalle parole greche che significano «scrivere» e «scossa»).

L'invenzione di Palmieri consisteva in un tubo orizzontale ripiegato verso l'alto agli estremi e riempito parzialmente di mercurio: quando il terreno subiva una scossa, il mercurio si spostava da una parte all'altra del tubo. Naturalmente lo strumento reagiva ai terremoti, ma anche a qualsiasi altro genere di vibrazione, comprese quelle provocate dal passaggio di un carro nelle vicinanze.

Un congegno molto più utile, da cui sono derivati tutti quelli successivi, fu costruito nel 1880 da un ingegnere inglese, John Milne. Cinque anni prima, Milne si era recato a Tokyo a insegnare geologia e scienze minerarie; lì aveva avuto ampie opportunità di studiare i terremoti, così frequenti in Giappone. Il risultato di tali studi fu il suo sismografo.

Nella sua forma più semplice, il sismografo di Milne consiste in una grossa massa sospesa a una molla relativamente delicata, a sua volta connessa saldamente, tramite un supporto, al fondo roccioso. Quando la terra si muove, la massa sospesa resta ferma a causa dell'inerzia, mentre la molla attaccata al sostrato roccioso si tende o si contrae leggermente con il moto terrestre. Tale vibrazione viene registrata mediante una penna che, attaccata alla massa sospesa, scrive su un foglio annerito con nerofumo, avvolto attorno a un tamburo che ruota lentamente. In realtà le masse sospese sono due: una è orientata in modo da registrare le onde sismiche che si spostano nella direzione nord-sud e l'altra quelle che si spostano nella direzione est-ovest.

Le vibrazioni ordinarie, quelle che non hanno origine nel sostrato roccioso, non esercitano alcuna azione sul sismografo. Oggigiorno i sismografi più sensibili, per esempio quello della Fordham University, usano un raggio di luce al posto del pennino, per evitare l'attrito del pennino sulla carta. Il raggio luminoso colpisce un foglio di carta sensibile, lasciando una traccia che viene poi sviluppata come una fotografia.

Milne svolse una vasta ed efficace azione, organizzando stazioni di studio dei terremoti e dei fenomeni a essi collegati in varie parti del mondo, particolarmente in Giappone. Nel 1900 esistevano tredici stazioni sismografiche funzionanti; oggi ve ne sono più di 500, sparse su tutti i continenti, compresa l'Antartide. Già dieci anni dopo l'entrata in funzione della prima stazione, era chiara l'esattezza dell'intuizione di Michell, che considerava i terremoti come conseguenza di onde che si propagano attraverso la terra.

Questa nuova comprensione dei terremoti non ha certo significato una diminuzione della loro frequenza o dei danni da essi provocati. Gli anni settanta sono stati, infatti, particolarmente contrassegnati da gravi sismi.

Il 27 luglio 1976 un terremoto in Cina distrusse una città a sud di Pechino, uccidendo circa 650 mila persone. Questo è stato il peggior disastro del genere dopo quello di quattro secoli prima nello Shensi. Sempre in quegli anni vi furono altri gravi terremoti in Guatemala, Messico, Italia, Filippine, Romania e Turchia.

Questi terremoti non devono far pensare che il nostro pianeta stia diventando più instabile. I moderni mezzi di comunicazione ci informano del verificarsi di un terremoto, ovunque esso avvenga - spesso anzi, grazie alla televisione, possiamo assistere immediatamente agli effetti del disastro - mentre in tempi precedenti (anche solo pochi decenni fa) le catastrofi più lontane passavano inosservate e non facevano notizia. Oggi è inoltre più probabile che un terremoto risulti catastrofico rispetto al passato, anche soltanto a un secolo fa, sia perché sulla terra vivono molte più persone, e molto più addensate, specie nelle città, sia perché le strutture fabbricate dall'uomo e vulnerabili ai terremoti sono molto più numerose e costose.

Ragione di più per cercare dei metodi che consentano di prevedere in anticipo i terremoti. I sismologi vanno in cerca di sintomi che possano risultare significativi: per esempio, rigonfiamenti del suolo in qualche posto, o spostamenti nelle rocce, che potrebbero divaricarsi o comprimersi l'una contro l'altra, assorbendo acqua o al contrario emettendone, il che renderebbe significativo l'elevarsi o il calare del livello dei pozzi; potrebbero anche manifestarsi alterazioni del magnetismo naturale o della conducibilità elettrica delle rocce. Gli animali che, al contrario degli esseri umani troppo indaffarati, avvertono le minime vibrazioni o alterazioni nel loro ambiente, potrebbero manifestare segni di nervosismo.

I cinesi, in particolare, si sono messi a raccogliere notizie su qualsiasi avvenimento insolito, perfino sulle vernici che si scrostano, e sostengono di aver previsto un terremoto avvenuto il 4 febbraio 1975 nella Cina nord-orientale: la gente in quell'occasione abbandonò le proprie case fuggendo all'aperto fuori delle città, e migliaia di vite furono salvate. Tuttavia il terremoto del 1976, assai più grave, non fu previsto.

Vi è anche da osservare che, finché le previsioni non risulteranno più attendibili, gli allarmi possono fare più male che bene. Un falso allarme può creare lo scompiglio nella vita e nell'economia di un paese, facendo più danni di un leggero terremoto. Senza contare che, dopo un paio di falsi allarmi, anche una previsione esatta correrebbe il rischio di venire ignorata.

Non deve sorprendere il fatto che un terremoto possa provocare danni tanto ingenti: si stima infatti che i più violenti terremoti liberino un'energia totale pari a quella di 100 mila bombe atomiche ordinarie, o, se si preferisce, di 100 superbombe all'idrogeno. È solo grazie al fatto che le loro energie vengono dissipate su una superficie molto vasta che i terremoti non risultano assai più distruttivi di quanto già non siano in realtà. Essi possono far vibrare la terra come se fosse un gigantesco diapason. Il terremoto verificatosi nel 1960 in Cile provocò una vibrazione del nostro pianeta della frequenza di poco meno di un periodo all'ora (20 ottave sotto al semitono del do, quindi del tutto inaudibile).

L'intensità di un terremoto viene misurata su una scala che va da 0 a 9, nella quale ogni grado rappresenta un'energia liberata circa 31 volte superiore a quella del grado precedente. (Non è mai stato registrato un terremoto di intensità superiore al nono grado, ma il terremoto avvenuto in Alaska il Venerdì Santo del 1964 raggiunse un'intensità pari a 8,5.) Questa scala viene chiamata "scala Richter", perché venne introdotta nel 1935 dal sismologo americano Charles Francis Richter.

Un aspetto positivo dei terremoti sta nel fatto che non tutta la superficie terrestre è ugualmente esposta ai loro pericolosi effetti (anche se questo non consolerà molto chi vive invece in una regione a rischio).

Circa l'80 per cento dell'energia sismica totale è liberata nelle aree che si affacciano sull'immenso Oceano Pacifico; un altro 15 per cento viene liberato entro una fascia che attraversa il Mediterraneo da est a ovest. Queste zone sismiche sono strettamente associate alla presenza di aree vulcaniche ed è questa una delle ragioni per cui si pensò al calore interno come a una possibile causa dei terremoti.

I VULCANI.

I vulcani sono un fenomeno naturale altrettanto terrificante dei terremoti. Le loro manifestazioni durano più a lungo ma, in compenso, nella maggior parte dei casi, i loro effetti restano confinati in zone più ristrette. Si conoscono circa 500 vulcani che sono stati attivi in tempi storici, due terzi dei quali lungo le coste del Pacifico. In certe occasioni, per fortuna rare, quando in un vulcano rimangono intrappolati grandi quantitativi di acqua che viene surriscaldata, possono verificarsi catastrofi spaventose. Il 26-27 agosto 1883 l'isoletta vulcanica di Krakatoa, situata nelle Indie orientali, nello stretto tra Sumatra e Giava, esplose con un boato che è stato descritto come il rumore più violento mai prodottosi sulla terra durante tempi storici. Il rumore venne udito da persone distanti anche cinquemila chilometri e fu registrato dagli strumenti di tutte le parti del mondo. Le onde acustiche fecero più volte il giro del pianeta. Venti chilometri cubi di roccia vennero ridotti in frantumi e scagliati in aria, e ricaddero poi su una superficie di quasi 800 mila chilometri quadrati; le ceneri oscurarono il cielo per centinaia di chilometri quadrati; per anni la polvere rimasta nella stratosfera illuminò i tramonti. Le onde di maremoto, alte più di 30 metri, uccisero 36 mila persone sulle spiagge di Giava e Sumatra; gli effetti di tali ondate si poterono rilevare in tutte le parti del mondo.

Un evento di questo genere, con conseguenze ancora peggiori, potrebbe aver avuto luogo più di tremila anni prima, nel Mediterraneo. Nel 1967 gli archeologi americani scoprirono i resti ricoperti di cenere di una città nella piccola isola di Thíra (Santorino), 130 chilometri a nord di Creta; a quanto sembra essa esplose intorno al 1400 avanti Cristo in modo analogo a Krakatoa, ma con violenza ancora maggiore, producendo forse un boato ancora più forte e provocando conseguenze ancora più disastrose. Lo tsunami che seguì colpì l'isola di Creta, che allora era sede di una antica e mirabile civiltà, infliggendole un durissimo colpo dal quale essa non si riprese più. Il dominio dei mari esercitato fino ad allora da Creta venne meno, seguì un periodo di oscurità e di confusione, e occorsero molti secoli per una ripresa. La scomparsa drammatica di Thíra sopravvisse nelle menti dei superstiti, e il suo racconto venne tramandato da una generazione all'altra con continui abbellimenti. Potrebbe essere stato questo avvenimento ad aver originato il mito di Atlantide, narrato da Platone circa undici secoli dopo la fine di Thíra e della civiltà cretese.

L'eruzione vulcanica forse più famosa nella storia mondiale fu di proporzioni assai limitate rispetto a quelle di Krakatoa e di Thíra.

Si tratta dell'eruzione del Vesuvio, avvenuta nel 79 dopo Cristo, che seppellì Pompei ed Ercolano, luoghi di soggiorno dei romani; fino ad allora il Vesuvio era stato considerato un vulcano spento. Il famoso naturalista Gaio Plinio Secondo, detto Plinio il Vecchio, morì in quella catastrofe, successivamente descritta da suo nipote, Plinio il Giovane, che ne fu testimone oculare.

Gli scavi delle città sepolte cominciarono in modo sistematico dopo il 1763 e offrirono un'opportunità rara di studiare resti relativamente intatti di città fiorite durante il periodo più prospero dell'antichità.

Un altro fenomeno insolito è la nascita di un nuovo vulcano. L'impressionante evento poté essere osservato il 20 febbraio 1943 in Messico, quando nel villaggio di Paricutin, poco più di 300 chilometri a ovest di Città del Messico, cominciò a formarsi un vulcano in quello che era stato un tranquillo campo di grano. In otto mesi aveva prodotto un cono coperto di ceneri alto quasi 500 metri. Naturalmente si dovette abbandonare il villaggio.

Nel complesso, non sembra che gli americani si siano mai molto preoccupati delle eruzioni vulcaniche, che sembrano avvenire soprattutto negli altri paesi. A dire il vero, il più grande vulcano attivo si trova nelle isole Hawaii, che sono un possedimento americano da più di ottant'anni e uno degli Stati Uniti da più di trent'anni.

Kilauea ha un cratere la cui area misura una decina di chilometri quadrati, ed è frequentemente in attività. Tuttavia, le sue eruzioni non sono mai esplosive, e, anche se la lava trabocca periodicamente dal cratere, essa si muove abbastanza lentamente da limitare i rischi per le vite umane, benché talora provochi danni economici notevoli. Nel 1983 il vulcano ha avuto un'attività insolita.

La catena delle Cascate, che segue la costa del Pacifico a una distanza verso l'interno di 150-250 chilometri, estendendosi dal nord della California fino alla parte meridionale della Columbia Britannica, comprende parecchie vette famose, come il monte Hood e il monte Rainier, vulcani di cui si sa che sono estinti. Proprio per questo essi non suscitano preoccupazioni, anche se un vulcano può rimanere inattivo per secoli, e poi risvegliarsi improvvisamente con un boato.

Questa realtà si è riproposta agli americani in modo drammatico a proposito del monte Sant'Elena, nella zona centro-meridionale dello stato di Washington. Questo vulcano era stato attivo tra il 1831 e il 1854, ma allora la gente che viveva da quelle parti non era molta, e si conoscono pochi particolari in proposito. Per quasi 130 anni esso rimase assolutamente inattivo, poi, il 18 maggio 1980, dopo qualche scossa e boato di avvertimento, entrò improvvisamente in eruzione.

Venti persone, che non avevano preso la precauzione elementare di allontanarsi dalla zona, rimasero uccise, e più di cento risultarono disperse. Da allora il Sant'Elena è rimasto sempre attivo e, anche se non vi sono state manifestazioni vulcaniche molto intense, quella è stata la prima eruzione verificatasi dopo molto tempo nella parte continentale degli Stati Uniti.

Oltre alle perdite immediate di vite umane, le eruzioni vulcaniche causano altri danni. Se sono di grandi proporzioni, esse scagliano nell'atmosfera enormi quantità di polvere, che raggiungono gli strati più alti: possono passare anni e anni prima che tale polvere si depositi. Dopo l'eruzione di Krakatoa, vi furono per un lungo periodo tramonti sfolgoranti, dovuti alla diffusione della luce del sole al tramonto da parte della polvere. Un effetto meno gradevole consiste nel fatto che la polvere può riflettere la luce solare, causando per un certo tempo una diminuzione della quantità di calore che raggiunge la superficie della terra.

Qualche volta l'effetto ritardato è relativamente localizzato, ma catastrofico. Nel 1783 il vulcano di Laki, nell'Islanda centro-meridionale, cominciò a eruttare. La lava, nel corso di un'eruzione durata due anni, ricoprì quasi 600 chilometri quadrati, senza provocare direttamente particolari danni; ma le ceneri e l'anidride solforosa ricaddero su quasi tutto il territorio dell'Islanda, raggiungendo perfino la Scozia. Le ceneri oscurarono il cielo, e i raccolti andarono perduti per mancanza di luce solare. Le esalazioni di anidride solforosa uccisero i tre quarti degli animali domestici che si trovavano sull'isola. Diecimila islandesi, un quinto della popolazione totale, in conseguenza della morte degli animali domestici e della perdita dei raccolti, morirono di fame e di malattie.

Il 7 aprile 1815 il monte Tambora, situato su un'isoletta a est di Giava, esplose. Centocinquanta chilometri cubi di roccia e di polveri vennero scagliati negli strati superiori dell'atmosfera. La luce del sole, di conseguenza, venne riflessa in misura maggiore del solito, e le temperature sulla terra per un anno circa rimasero inferiori a quelle abituali. Nel New England, per esempio, il 1816 fu eccezionalmente freddo, con ondate di gelo in tutti i mesi dell'anno, compresi luglio e agosto. Fu chiamato «l'anno senza estate».

A volte i vulcani uccidono subito, ma non necessariamente con la lava e neppure con le ceneri. L'8 maggio 1902 vi fu un'eruzione del monte Pelée, sull'isola della Martinica nelle Indie occidentali.

L'esplosione produsse una densa nuvola di fumi e di gas roventi, che si riversarono a grande velocità lungo il fianco della montagna, dirigendosi verso Saint Pierre, la principale cittadina dell'isola: in tre minuti i 38 mila abitanti della città morirono asfissiati. L'unico a sopravvivere, perché detenuto in una prigione sotterranea, fu un criminale che avrebbe dovuto essere impiccato quel giorno stesso se tutti gli altri non fossero morti.

FORMAZIONE DELLA CROSTA TERRESTRE.

La moderna ricerca sui vulcani e sul loro ruolo nella formazione di gran parte della crosta terrestre ebbe inizio con gli studi del geologo francese Jean Etienne Guettard verso la metà del Settecento.

Per qualche tempo, sul finire di quello stesso secolo, gli sforzi solitari del geologo tedesco Abraham Gottlob Werner diffusero la falsa notizia che la maggior parte delle rocce avesse origine sedimentaria, da un oceano che un tempo avrebbe coperto tutto il mondo ("nettunismo"). Invece solide prove, specie quelle presentate da Hutton, resero praticamente certo il fatto che la maggior parte delle rocce si fosse formata attraverso l'azione dei vulcani ("plutonismo"). Tanto i vulcani quanto i terremoti sembrerebbero manifestazioni dell'energia interna della terra, che deriva prevalentemente dalla radioattività (vedi capitolo settimo).

Quando i sismografi consentirono di studiare nei particolari le onde sismiche, si scoprì che quelle più facili da analizzare erano di due tipi generali: onde superficiali che seguono la curvatura terrestre, e onde che penetrano nell'interno - e, in virtù del percorso più breve, di solito raggiungono per prime i sismografi. Queste ultime, a loro volta, sono di due tipi: primarie ("onde P") e secondarie ("onde S").

Le onde primarie, come quelle sonore, si propagano tramite compressioni ed espansioni alternate del mezzo (per farsene un'idea intuitiva, si pensi al movimento di una fisarmonica). Queste onde possono passare attraverso qualsiasi mezzo - solido o fluido. Le onde secondarie, invece, consistono nelle consuete oscillazioni sinusoidali perpendicolari alla direzione di propagazione, e non possono viaggiare nei liquidi o nei gas.

Le onde primarie si spostano più velocemente di quelle secondarie e di conseguenza raggiungono prima le stazioni sismografiche. In base al ritardo delle onde secondarie è possibile stimare la distanza del terremoto; il suo epicentro (cioè il luogo della superficie terrestre situato direttamente al di sopra del movimento tellurico) può essere localizzato con precisione, di solito in base alle distanze rilevate da tre stazioni: facendo centro nei luoghi di rilevamento si tracciano infatti tre cerchi aventi come raggi tali distanze: i tre cerchi si intersecheranno in un punto, che è quello cercato.

La velocità delle onde sia di tipo P che S dipende dalla natura delle rocce, dalla temperatura e dalla pressione, come hanno mostrato ricerche di laboratorio. Pertanto le onde sismiche possono essere usate come sonde per indagare le condizioni presenti in profondità, al di sotto della superficie terrestre.

Un'onda primaria in prossimità della superficie percorre 8 chilometri al secondo; a 1600 chilometri di profondità, giudicando dai tempi di arrivo, la sua velocità deve avvicinarsi ai 13 chilometri al secondo. Analogamente, un'onda secondaria ha una velocità inferiore ai 5 chilometri al secondo vicino alla superficie, e pari a 6,5 chilometri al secondo a una profondità di 1600 chilometri. Dato che l'aumento della velocità indica un aumento di densità, possiamo stimare il valore della densità della roccia in profondità. Alla superficie terrestre, come ho già detto, la densità media è di 2,8 grammi per centimetro cubo; a 1600 chilometri di profondità, arriva a 5 grammi per centimetro cubo; a circa 2900, raggiunge i 6 grammi per centimetro cubo.

Alla profondità di 2900 chilometri si verifica un brusco cambiamento: le onde secondarie vengono improvvisamente arrestate. Ciò indusse, nel 1906, il geologo inglese Richard Dixon Oldham a pensare che la regione sottostante fosse liquida: a tale profondità le onde hanno raggiunto il limite del nucleo liquido della terra. Quanto alle onde primarie, quando raggiungono tale livello, cambiano improvvisamente direzione, evidentemente subendo una rifrazione allorché penetrano nel nucleo liquido.

Il contorno del nucleo liquido viene chiamato "discontinuità di Gutenberg", in onore del geologo americano Beno Gutenberg che lo determinò nel 1914, mostrando che il nucleo si estendeva per quasi 3500 chilometri dal centro della terra. La densità dei vari strati profondi della terra fu calcolata nel 1936, in base ai dati sismici, dal matematico australiano Keith Edward Bullen. Le sue conclusioni furono confermate dai dati ottenuti in seguito al violento terremoto avvenuto in Cile nel 1960. Possiamo pertanto affermare che in corrispondenza della discontinuità di Gutenberg la densità passa improvvisamente da 6 a 9, per crescere poi gradualmente fino a 11,5 grammi per centimetro cubo al centro della terra.

IL NUCLEO LIQUIDO.

Qual è la natura del nucleo liquido? Esso deve essere costituito da una sostanza avente una densità compresa tra 9 e 11,5 grammi per centimetro cubo, nelle condizioni di temperatura e di pressione ivi presenti. Si stima che la pressione vada da 1,5 milioni di atmosfere (1500 tonnellate al centimetro quadro), al limite superiore del nucleo liquido, a 3,9 milioni di atmosfere al centro della terra. Sulla temperatura si è più incerti. In base a quanto si sa sull'aumento della temperatura in funzione della profondità nelle miniere, e in base alla conducibilità termica delle rocce, i geologi stimano (con grande approssimazione) che le temperature del nucleo liquido debbano aggirarsi sui 5000 gradi C. (Il centro del pianeta Giove, molto più grande della terra, può forse raggiungere i 50 mila gradi C.)

La sostanza che costituisce il nucleo deve essere un elemento molto comune - abbastanza per formare una sfera con un diametro pari alla metà di quello terrestre e una massa pari a un terzo. L'unico elemento pesante che sia tanto comune nell'universo è il ferro. Alla superficie terrestre la sua densità è di soli 7,86 grammi per centimetro cubo, ma, sottoposto alle elevatissime pressioni del nucleo, avrebbe una densità compresa nell'intervallo richiesto - da 9 a 12 grammi per centimetro cubo. Ciò che più conta, nelle condizioni esistenti al centro della terra, sarebbe liquido.

Se tutto ciò non basta, un'ulteriore conferma viene dai meteoriti.

Questi appartengono a due categorie, "meteoriti litoidi", composti soprattutto di silicati, e "meteoriti ferrosi", costituiti per il 90 per cento circa di ferro, per il 9 per cento di nichel e per l'1 per cento di altri elementi. Molti scienziati ritengono che i meteoriti siano residui di asteroidi frantumatisi, alcuni dei quali erano forse abbastanza grandi da avere parti rocciose e parti metalliche, queste ultime costituite di nichel e ferro. Anche il nucleo della terra potrebbe quindi esser costituito di nichel e ferro. (Del resto, già nel 1866, quando i sismologi erano ben lungi dallo studiare il centro della terra, il fatto che alcuni meteoriti avessero una composizione a base di ferro aveva suggerito al geologo francese Gabriel Auguste Daubrée l'idea che anche il nucleo del nostro pianeta fosse fatto di ferro.)

Oggi i geologi in genere accettano come un dato di fatto, per quanto riguarda la struttura della terra, il nucleo liquido di ferro e nichel; tuttavia, la teoria odierna è più complessa. Nel 1936, infatti, la geologa danese Inge Lehmann, nel tentativo di spiegare l'insolita presenza di onde P in una "zona d'ombra", cioè in una zona superficiale in cui tali onde non avrebbero dovuto arrivare, fu indotta a pensare che nel nucleo, a circa 1300 chilometri dal centro, dovesse esserci una discontinuità tale da introdurre un'ulteriore deflessione delle onde, facendone finire alcune nella zona d'ombra.

Gutenberg appoggiò tale punto di vista, e oggi molti geologi distinguono un "nucleo esterno", liquido, di nichel e ferro, da un "nucleo interno", sotto qualche aspetto diverso dal primo, forse perché solido o forse per composizione chimica. In seguito ai violenti terremoti avvenuti in Cile nel 1960, come abbiamo già accennato, l'intero globo si mise a vibrare lentamente, proprio con la frequenza prevista dall'ipotesi del nucleo interno, apportando così un forte sostegno alla tesi della Lehmann.

IL MANTELLO TERRESTRE.

La parte della terra che circonda il nucleo di nichel e ferro viene chiamata "mantello". A quanto si sa, esso è composto di silicati, ma a giudicare dalla velocità con la quale le onde sismiche l'attraversano, questi silicati differiscono dalle rocce tipiche della superficie terrestre, come mostrò per la prima volta nel 1919 il chimico-fisico americano Leason Heberling Adams. Le loro proprietà fanno pensare che siano rocce del tipo chiamato "olivina" (di color verde oliva), cioè relativamente ricche di magnesio e ferro e povere di alluminio.

Il mantello non si estende fino alla superficie terrestre. Un geologo croato, Andrija Mohorovicic, studiando le onde prodotte da un terremoto nei Balcani, nel 1909, stabilì che vi era un brusco aumento nella loro velocità in un punto situato a circa 32 chilometri sotto la superficie. Oggi questa "discontinuità di Mohorovicic" (detta anche "Moho", per brevità) viene considerata il limite della crosta terrestre.

Sulla natura della crosta e della parte superiore del mantello forniscono molte informazioni le onde di superficie di cui ho parlato in precedenza. Come le onde che attraversano la terra, anche quelle superficiali si suddividono in due categorie: le "onde Love" (che prendono il nome dal loro scopritore, Augustus Edward Hough Love), che sono oscillazioni orizzontali, simili alle sinuosità del corpo di un serpente che striscia per terra; e le "onde Rayleigh" (che prendono il nome dal fisico inglese John William Strutt, Lord Rayleigh), che sono verticali, simili al moto del mitico serpente marino nell'acqua.

L'analisi delle onde superficiali (svolta soprattutto da Maurice Ewing della Columbia University) mostra che lo spessore della crosta è variabile. Essa è più sottile sotto i bacini oceanici, dove la discontinuità di Moho, in certi punti, si trova a solo 13-16 chilometri sotto il livello del mare. Dato che gli stessi oceani in certe zone raggiungono una profondità di 8-11 chilometri, la crosta solida sotto alle profondità oceaniche può essere spessa solo 5 chilometri. Invece, sotto ai continenti, la discontinuità di Moho si trova a una profondità media di circa 32 chilometri sotto il livello del mare (è a circa 35 chilometri sotto la città di New York, per esempio), e scende fino a una profondità di circa 64 chilometri sotto alle catene montuose. Questo fatto, insieme a dati risultanti da misurazioni della gravità, mostra che la roccia delle catene montuose è meno densa della media.

La struttura della crosta in generale risulta composta da due tipi principali di rocce, il basalto e il granito: il granito, che ha una densità inferiore, galleggia sul basalto costituendo i continenti e formando le montagne nei punti dove ha uno spessore particolarmente elevato (proprio come un grande iceberg si eleva sulle acque più di un iceberg piccolo). Le montagne giovani affondano le proprie radici di granito in profondità entro il basalto, ma poi compensano l'erosione che tende a livellarle, spostandosi lentamente verso l'alto con un moto di galleggiamento, che ristabilisce l'equilibrio delle masse, chiamato "isostasia" (denominazione proposta nel 1889 dal geologo americano Clarence Edward Dutton). Così, nei monti Appalachi, una catena molto antica, le radici sono quasi del tutto scomparse.

Il basalto sul fondo degli oceani è ricoperto da 400-800 metri di rocce sedimentarie, mentre il granito è assente o quasi - il bacino del Pacifico, per esempio, è del tutto privo di granito. Il fatto che la crosta sotto agli oceani sia così sottile ha fatto pensare a un progetto fantastico: perché non perforare la crosta fino a raggiungere la discontinuità di Moho, per saggiare la costituzione del mantello?

Non sarebbe un'impresa facile, perché bisognerebbe ancorare una nave sopra una fossa oceanica, far scendere attraverso chilometri di acqua le apparecchiature di trivellazione e poi perforare uno spessore di roccia quale non si è mai trivellato fino a oggi. L'entusiasmo del primo momento per questo progetto è sfumato, e oggi la questione è rinviata a tempi migliori.

Il fatto che il granito «galleggi» sul basalto suggerisce inevitabilmente l'idea di una possibile "deriva dei continenti". Nel 1912 il geologo tedesco Alfred Lothar Wegener avanzò l'ipotesi che i continenti siano stati, in origine, un unico blocco di granito, che egli denominò Pangea; in qualche epoca molto remota della storia della terra, questo unico blocco si sarebbe spezzato e i continenti sarebbero andati alla deriva. Una deriva che, secondo Wegener, continuerebbe anche ai giorni nostri - per esempio, la Groenlandia si allontanerebbe dall'Europa alla velocità di quasi un metro all'anno.

Il fatto che più contribuì a suscitare quest'idea nella mente di Wegener (e anche di altri, a cominciare da Francesco Bacone verso il 1620) fu la coincidenza tra la forma della costa orientale del Sudamerica e quella della costa occidentale dell'Africa.

Per mezzo secolo la teoria di Wegener fu considerata con grande scetticismo; ancora nel 1960 (quando fu pubblicata la prima edizione di questo libro) io mi sentivo giustificato nel rifiutarla categoricamente, basandomi sull'opinione generale dei geofisici di quel tempo. L'argomentazione più convincente contro di essa era che il basalto sottostante sia agli oceani che ai continenti era senz'altro troppo rigido per consentire al granito dei continenti di andare alla deriva al proprio interno, anche nei milioni di anni che avrebbe avuto a disposizione.

Eppure i dati a favore della supposizione che un tempo l'Oceano Atlantico non esistesse e che i vari continenti formassero un'unica massa continentale crebbero in modo impressionante. Se si confrontano le sagome dei continenti, non già tenendo conto del profilo effettivo delle loro coste (un fatto accidentale, che dipende dall'attuale livello del mare), ma considerando il punto centrale della scarpata continentale (il basso fondale dell'oceano intorno a ogni continente, che resta allo scoperto nei periodi in cui il livello del mare è basso), si trova una notevole coincidenza lungo tutto l'Atlantico, a nord come a sud. Inoltre, le formazioni rocciose in alcune zone dell'Africa occidentale coincidono perfettamente con quelle delle corrispondenti zone orientali del Sudamerica. E, infine, lo spostamento dei poli magnetici avvenuto nel passato risulta meno sorprendente se si pensa che a migrare non siano stati i poli, ma i continenti.

Le prove a favore dell'ipotesi di Pangea e della sua successiva frattura non sono solo di carattere geografico, ma anche di carattere biologico, e queste ultime ancora più convincenti. Nel 1968, per esempio, fu trovato nell'Antartide un osso fossile lungo circa 6 centimetri che era appartenuto a un anfibio estinto: una creatura di quel genere non avrebbe mai potuto vivere così vicino al polo sud.

Pertanto, l'Antartide un tempo doveva trovarsi più distante dal polo, o quanto meno doveva avere una temperatura più mite. L'anfibio non avrebbe potuto attraversare un tratto, anche breve, di acqua salata; di conseguenza l'Antartide deve aver fatto parte di una massa continentale più estesa, contenente regioni più calde. In generale, i ritrovamenti di fossili concordano pienamente con l'ipotesi di Pangea e della sua successiva suddivisione in più parti.

È importante, a questo punto, mettere in evidenza le ragioni per cui i geologi si opponevano alla teoria di Wegener. La gente che imperversa ai margini della scienza spesso difende le proprie improbabili teorie sostenendo che gli scienziati tendono a essere dogmatici, e ad avere la mente chiusa a ogni idea nuova (cosa abbastanza vera in certi casi e in certi momenti, mai però nella misura sostenuta da questi teorici «marginali»). Spesso essi citano come esempio Wegener e la sua deriva dei continenti, ma del tutto a sproposito.

I geologi non si opponevano all'idea di Pangea e della sua suddivisione in più parti. Anzi, ipotesi anche più radicali, volte a spiegare come si sarebbe diffusa la vita sulla terra, venivano considerate favorevolmente. Ciò a cui i geologi si opponevano era il meccanismo specifico proposto da Wegener - il concetto di grandi blocchi di granito che vanno alla deriva in un «oceano» di basalto. Esistevano serie ragioni per opporsi a una simile idea, e tali ragioni valgono ancora oggi. I continenti, in effetti, non vanno alla deriva attraverso il basalto.

Deve esserci quindi un altro meccanismo che spieghi gli indizi di natura geografica e biologica che fanno pensare a cambiamenti di posizione dei continenti - un meccanismo più plausibile e sostenuto da prove. Discuterò tali prove più avanti in questo stesso capitolo; quanto al meccanismo, il geologo americano Harry Hammond Hess, verso il 1960, ritenne ragionevole, in base a nuove scoperte, ipotizzare che materia fusa proveniente dal mantello terrestre possa salire verso la superficie - per esempio, lungo certe linee di frattura che corrono per tutta la lunghezza dell'Oceano Atlantico - e giunta vicino alla sommità del mantello venga sospinta ai lati della frattura, dove si raffredderebbe e solidificherebbe. In tal modo il fondale oceanico viene spaccato e allargato. Quindi i continenti non vanno alla deriva; essi vengono invece allontanati dal fondale marino che si espande.

Per quanto se ne sa oggi, Pangea è esistita effettivamente ed era ancora intera non più di 225 milioni di anni fa, all'epoca dell'ascesa dei dinosauri. A giudicare dall'evoluzione e dalla

distribuzione di animali e piante, il fenomeno di suddivisione cominciò in modo deciso circa 200 milioni di anni fa; in seguito Pangea si spezzò in tre grosse porzioni: quella settentrionale (America del Nord, Europa e Asia) viene chiamata Laurasia; quella meridionale (Sudamerica, Africa e India) è chiamata Gondwana, dal nome di una provincia indiana; la terza parte è formata dall'Antartide e dall'Australia.

Circa 65 milioni di anni orsono, quando ormai i dinosauri erano estinti e sulla terra dominavano i mammiferi, il Sudamerica si separò a ovest dall'Africa, mentre a est l'India si spostò verso l'Asia meridionale. Infine il Nordamerica si staccò dall'Europa, l'India si saldò con l'Asia (mentre sulla linea di congiunzione sorgeva come una piega la catena dell'Himalaya), l'Australia si staccò dall'Antartide, e i continenti assunsero la configurazione attuale.

L'ORIGINE DELLA LUNA.

Un'idea ancora più sorprendente sui mutamenti che possono aver avuto luogo sulla terra nel corso delle ere geologiche è dovuta all'astronomo inglese George Howard Darwin (figlio di Charles Darwin), che nel 1879 avanzò l'ipotesi che la luna fosse un pezzo della terra staccatosi in tempi molto remoti, lasciando come cicatrice l'Oceano Pacifico. Si tratta di un'idea interessante, considerato che la luna ha una massa poco superiore all'un per cento della massa totale del sistema terra-luna ed è abbastanza piccola per entrare in uno spazio dell'estensione del Pacifico. Se la luna fosse effettivamente costituita di materia proveniente dagli strati esterni della terra, si spiegherebbe perché essa non contiene un nucleo ferroso e ha una densità molto inferiore a quella della terra, e si spiegherebbe anche come mai il fondale del Pacifico sia privo di granito continentale.

La possibilità che le cose siano andate così è però alquanto remota per varie ragioni; in pratica oggi non c'è geologo o astronomo che creda a questa ipotesi. Tuttavia, sembra certo che in passato la luna fosse più vicina alla terra di quanto non sia oggi.

L'attrazione gravitazionale esercitata dalla luna provoca maree tanto negli oceani che nella crosta solida della terra. Con la rotazione terrestre, l'acqua degli oceani viene sospinta su fondali bassi, mentre strati di roccia si innalzano e si abbassano, sfregando l'uno contro l'altro. L'attrito che ne deriva implica una lenta conversione in calore dell'energia di rotazione della terra, il che provoca un aumento graduale del suo periodo di rotazione. L'effetto non è rilevante su una scala temporale umana, perché il giorno si allunga di un secondo in circa 62500 anni. Se la terra perde energia rotazionale, il momento angolare deve comunque essere conservato; ciò che la terra perde, lo guadagna la luna: la velocità con cui essa compie le sue rivoluzioni intorno alla terra aumenta, il che significa che il nostro satellite, seppur molto lentamente, si sta allontanando.

Se si risale indietro nel tempo fino a un passato geologico molto remoto, si vede che la rotazione terrestre doveva essere più veloce, il giorno significativamente più corto, la luna notevolmente più vicina e tutto il fenomeno più rapido. Darwin calcolò quando, nel passato, la luna avrebbe potuto essere tanto vicina alla terra da formare un corpo unico; ma anche senza spingerci tanto indietro nel tempo, dovremmo trovare le prove che nel passato il giorno era più corto. Per esempio, circa 570 milioni di anni fa - l'età a cui risalgono i fossili più antichi - il giorno doveva forse avere una durata di poco più di 20 ore, e in un anno dovevano esserci 428 giorni.

Oggi questa non è più soltanto una pura teoria. Esistono dei coralli che depositano strati di carbonato di calcio in determinate stagioni più attivamente che in altre, consentendo di contare gli strati annuali, come si fa per gli anelli dei tronchi d'albero. È stata anche proposta l'idea che alcuni siano più attivi di giorno che di notte, in modo che si possano distinguere sottilissimi strati giornalieri. Nel 1963, il paleontologo americano John West Wells contò gli strati più sottili presenti nei coralli fossili e trovò che vi erano, in media, 400 sottostrati giornalieri in ogni strato annuale in coralli che risalivano a 400 milioni di anni fa, mentre in quelli che risalivano a solo 320 milioni di anni fa i sottostrati erano 380 in ogni strato annuale.

Naturalmente, sorge la domanda: se allora la luna era molto più vicina alla terra e se quest'ultima ruotava più rapidamente, che cosa era accaduto in epoche ancora più remote? Se la teoria di Darwin sulla separazione della luna dalla terra non corrisponde ai fatti, cosa è successo invece?

Una delle idee proposte è che, in un qualche periodo del passato remoto, la luna sia stata catturata dalla terra. Se ciò fosse avvenuto, per esempio, 600 milioni di anni orsono, risulterebbe spiegato il fatto che si trovano numerosi fossili nelle rocce che risalgono all'incirca a quell'epoca, mentre in quelle precedenti non si trova altro che qualche dubbia traccia di carbonio. Forse tali rocce più antiche vennero completamente dilavate dalle immense maree che accompagnarono la cattura della luna. (A quel tempo non vi era vita sulla terraferma; se ci fosse stata, sarebbe rimasta distrutta.)

Se la luna venne veramente catturata, a quell'epoca doveva trovarsi più vicina di quanto non sia ora; ci sarebbero stati una recessione lunare e un allungamento del giorno a partire da quella data, ma niente del genere prima di allora.

Un'altra ipotesi è che la luna si sia formata nelle vicinanze della terra, dalla stessa nube di polvere che si andava addensando, e che da allora si sia continuamente allontanata, senza però essere mai stata effettivamente parte della terra.

Lo studio e l'analisi delle rocce lunari riportate sulla terra dagli astronauti negli anni settanta avrebbero potuto risolvere il problema (come avevano ottimisticamente sperato in molti), ma non lo fecero.

Per esempio, la superficie della luna è ricoperta di frammenti di vetro, che non si trovano sulla superficie terrestre. Inoltre, la crosta lunare è del tutto priva di acqua ed è povera (molto più di quella terrestre) di tutte le sostanze che fondono a temperature relativamente basse. Ciò sembrerebbe indicare che in passato la luna sia stata ordinariamente sottoposta ad alte temperature.

Si può allora supporre che all'epoca della sua formazione la luna avesse un'orbita molto ellittica, con l'afelio approssimativamente alla stessa distanza che ha oggi dal sole e il perielio nelle vicinanze dell'orbita di Mercurio. Forse seguitò a compiere le sue rivoluzioni in questo modo per qualche miliardo di anni, finché una particolare combinazione delle posizioni sua, della terra e forse di Venere provocò la sua cattura da parte della terra. La luna avrebbe allora cessato di essere un piccolo pianeta per diventare un satellite, ma la sua superficie mostrerebbe ancora i segni del periodo in cui il suo perielio era circa alla distanza di Mercurio.

D'altra parte, la formazione del vetro potrebbe esser dovuta al calore prodotto localmente dal bombardamento di meteoriti che ha dato origine ai crateri lunari. Oppure, nel caso molto improbabile che la luna si fosse staccata dalla terra, i frammenti di vetro potrebbero essere spiegati con il calore prodottosi durante un fenomeno così violento.

In realtà, tutte le ipotesi sull'origine della luna appaiono ugualmente improbabili; si è sentito qualche scienziato mormorare che, considerati con attenzione tutti i dati relativi al problema dell'origine della luna, l'unica conclusione possibile è che la luna non è veramente lì, nello spazio - una conclusione che equivale a dire che si deve proseguire nella ricerca. La risposta deve esserci, e la troveremo.

LA TERRA È STATA LIQUIDA?

Il fatto che la terra sia formata di due parti principali - il mantello di silicati e il nucleo di nichel e ferro (in proporzioni quasi uguali a quelle dell'albume e del tuorlo nell'uovo) - ha convinto quasi tutti i geologi che in qualche epoca della sua storia primordiale la terra debba essere stata liquida: avrebbe potuto in tal caso essere costituita di due liquidi insolubili l'uno nell'altro. I silicati liquidi, essendo più leggeri, avrebbero galleggiato in superficie e si sarebbero raffreddati irradiando il calore nello spazio. Il liquido ferroso sottostante, isolato dallo spazio, avrebbe invece ceduto il proprio calore molto più lentamente, restando pertanto allo stato fluido fino ad oggi.

Vi sono almeno tre processi tramite i quali la terra sarebbe potuta diventare tanto calda da fondere, anche se all'inizio fosse stata del tutto fredda, risultando da un ammassamento di planetesimali. Questi ultimi corpi, entrando in collisione e saldandosi, avrebbero dissipato la loro energia di moto ("energia cinetica") sotto forma di calore.

Inoltre, via via che il pianeta, crescendo, veniva compresso dalla forza gravitazionale, altra energia si sarebbe liberata sotto forma di calore. In terzo luogo, le sostanze radioattive presenti nella terra -uranio, torio, potassio - nel corso delle ere avrebbero liberato grandi quantità di calore via via che si disintegravano; nei primi tempi, quando il materiale radioattivo era molto più abbondante di oggi, la radioattività da sola avrebbe potuto fornire quantità di calore sufficienti a liquefare la terra.

Non tutti gli scienziati sono disposti ad accettare come fatto indubitabile che il nostro pianeta sia stato in una certa fase completamente liquido. Il chimico americano Harold Clayton Urey, in particolare, ha sostenuto che la maggior parte della terra è stata sempre solida. Egli ha fatto osservare che anche in una terra in prevalenza solida il nucleo ferroso avrebbe potuto formarsi tramite una lenta separazione del ferro, e che anche oggi forse il ferro sta migrando dal mantello nel nucleo al ritmo di 50 mila tonnellate al secondo.

L'OCEANO.

La terra presenta, rispetto agli altri pianeti del sistema solare, la singolare proprietà di avere una temperatura superficiale che consente l'esistenza dell'acqua in tutti e tre i suoi stati di aggregazione: liquido, solido e gassoso. Alcuni mondi che si trovano più lontani dal sole di quanto non sia la terra sono sostanzialmente coperti di ghiaccio - per esempio, Ganimede e Callisto. Europa ha la superficie completamente ricoperta da un ghiacciaio, sotto al quale potrebbe esserci dell'acqua liquida, ma tutti questi mondi lontani dal sole possono presentare soltanto tracce insignificanti di vapore acqueo al di sopra della superficie.

La terra è l'unico corpo del sistema solare, per quanto ne sappiamo, che possegga degli oceani, cioè delle vaste masse di acqua liquida, sulla sua superficie (sugli altri corpi celesti non vi sono, comunque, in superficie neppure masse liquide di altra natura). In realtà, sarebbe meglio dire che la terra possiede un oceano, perché gli oceani Pacifico, Atlantico, Indiano, Artico e Antartico non sono che parti comunicanti di un'unica massa di acqua salata, in cui il blocco formato da Asia, Africa ed Europa, il continente americano e corpi più piccoli, come l'Antartide e l'Australia, possono essere considerati come isole.

I dati relativi a questo oceano sono impressionanti. Esso ha un'area totale di circa 360 milioni di chilometri quadrati e copre il 71 per cento della superficie terrestre; il suo volume, calcolando che la profondità media degli oceani sia di 3,75 chilometri, è di circa 13,50 milioni di chilometri cubi. Esso contiene il 97,2 per cento dell'H2O presente sulla terra ed è anche la fonte di tutta l'acqua dolce della terra, perché oltre 330 mila chilometri cubi di oceano evaporano ogni anno per ricadere sotto forma di pioggia o di neve. Per effetto di tali precipitazioni, sotto la superficie dei continenti c'è una riserva di acqua dolce pari a circa 834 mila chilometri cubi, mentre altri 125 mila sono raccolti in superficie, nei laghi e nei fiumi.

Da un altro punto di vista, però, l'oceano è meno imponente: per enorme che esso sia, non costituisce che poco più di 1 su 4000 della massa totale della terra; se immaginiamo quest'ultima ridotta alle dimensioni di una palla da biliardo, l'oceano sarebbe rappresentato, in proporzione, da una pellicola di umidità a malapena visibile. Scendendo nelle zone più profonde degli oceani, non si sarebbe che a 1 su 580 della distanza totale tra la superficie e il centro della terra - e tutto il resto di tale distanza sarebbe costituito prima da roccia e poi da metallo.

Eppure, quella pellicola quasi impercettibile di umidità per noi significa tutto. È lì che hanno avuto origine le prime forme di vita; e, da un punto di vista puramente quantitativo, gli oceani contengono ancor oggi la maggior parte della vita presente sul nostro pianeta.

Sulla terraferma, la vita è confinata entro uno spessore di pochi metri sopra o sotto la superficie (anche se uccelli e aerei compiono sortite temporanee fuori da tale base); negli oceani la vita occupa in permanenza ogni angolo di un regno che in certi punti raggiunge una profondità di 11 chilometri e più.

Eppure, fino a non molto tempo fa, gli esseri umani sapevano degli abissi oceanici, e in particolare del fondale dell'oceano, non più di quanto ne avrebbero potuto sapere se esso si fosse trovato su Venere.

LE CORRENTI.

Fondatore dell'oceanografia moderna fu un ufficiale della Marina statunitense, Matthew Fontaine Maury. Era sulla trentina quando rimase zoppo in seguito a un incidente, che, benché triste per lui, si dimostrò utile per l'umanità. Gli venne affidata la custodia delle carte e degli strumenti nautici (una sinecura, senza dubbio), ed egli si buttò anima e corpo nell'ardua impresa di tracciare una mappa delle correnti marine. In particolare, studiò il corso della corrente del Golfo, che già nel 1769 era stata oggetto di una prima indagine, a opera dello studioso americano Benjamin Franklin. Maury ne diede una descrizione che è rimasta classica nell'oceanografia: «È come un fiume nell'oceano». Certamente si tratta di un fiume molto più grande di tutti i fiumi della terraferma; esso trasporta un volume d'acqua per secondo mille volte superiore a quello trasportato dal Mississippi; all'inizio è largo 80 chilometri, profondo quasi 800 metri, e raggiunge una velocità di oltre 6 chilometri all'ora. I suoi effetti di riscaldamento si avvertono anche nella lontana isola settentrionale di Spitzbergen.

Maury diede anche l'avvio a una collaborazione internazionale nello studio degli oceani; fu l'animatore di una storica conferenza internazionale tenuta a Bruxelles nel 1853. Nel 1855 egli pubblicò il primo trattato di oceanografia, dal titolo "Physical Geography of the Sea". L'Accademia navale di Annapolis, a ricordo dei suoi contributi, gli intitolò la Maury Hall.

In seguito sono state tracciate mappe complete di tutte le correnti marine. Queste descrivono ampi cerchi in senso orario negli oceani dell'emisfero settentrionale e in senso antiorario in quelli dell'emisfero meridionale, grazie all'effetto Coriolis. La corrente del Golfo non è che il ramo occidentale di una corrente che circola in senso orario nel nord dell'Atlantico e che, a sud di Terranova, si dirige decisamente verso est, attraverso l'oceano ("corrente nord-atlantica"). Parte di tale corrente viene deviata dalla costa europea intorno alle isole britanniche e risale fino alla costa norvegese, mentre il resto si dirige verso sud, lungo le coste nord-occidentali dell'Africa. Quest'ultimo ramo lambisce le Canarie, e da esse prende nome. La configurazione della costa africana, insieme all'effetto Coriolis, sospinge la corrente a ovest attraverso l'Atlantico ("corrente equatoriale settentrionale"); così essa raggiunge i Caraibi, dove il circuito ricomincia da capo.

Un vortice in senso antiorario, ancora più ampio, sposta grandi masse di acqua lungo le coste dell'Oceano Pacifico, a sud dell'equatore. La corrente, sfiorando i continenti, si muove verso nord dall'Antartico lungo la costa occidentale del Sudamerica, spingendosi fino al Perù.

Questa porzione del circuito costituisce la "corrente fredda del Perù", o "di Humboldt" (così chiamata in onore del naturalista tedesco Alexander von Humboldt, che per primo la descrisse attorno al 1810). La configurazione della linea costiera peruviana concorre con l'effetto Coriolis a sospingere questa corrente verso ovest, attraverso il Pacifico, subito al di sotto dell'equatore ("corrente equatoriale meridionale"); una parte di essa riesce ad aprirsi un varco attraverso le acque dell'arcipelago indonesiano arrivando fino all'Oceano Indiano, mentre la parte rimanente si dirige verso sud, costeggia le rive orientali dell'Australia e poi piega nuovamente verso est.

Questi vortici di acqua contribuiscono a rendere in una certa misura uniforme la temperatura dell'oceano, e indirettamente anche quella delle zone costiere dei continenti. Vi sono comunque disomogeneità di temperatura, che tuttavia, senza le correnti marine, sarebbero molto più accentuate.

La maggior parte delle correnti oceaniche si muove lentamente, anche più lentamente di quella del Golfo. Ciononostante, sono talmente vaste le aree dell'oceano che partecipano alla circolazione, che le masse di acqua spostate sono enormi. Al largo di New York la corrente del Golfo sposta l'acqua verso nord-est a un ritmo tale per cui attraverso una determinata linea passano circa 45 milioni di tonnellate al secondo.

Anche nelle regioni polari vi sono delle correnti marine. Tanto quelle in senso orario dell'emisfero settentrionale quanto quelle in senso antiorario dell'emisfero meridionale hanno l'effetto di spostare le masse di acqua da ovest verso est nel tratto circumpolare.

A sud dei continenti sudamericano, africano e australiano vi è una corrente che gira da ovest verso est intorno all'Antartide, attraverso l'oceano, senza incontrare ostacoli (è questo l'unico luogo della terra in cui l'acqua può andare da ovest verso est senza mai incontrare terre emerse). Questa "corrente circumpolare antartica" è la più grande corrente oceanica del pianeta: essa ha una portata di quasi 100 milioni di tonnellate di acqua al secondo.

Nelle regioni artiche la circolazione della corrente è invece interrotta dalla terraferma; vi sono quindi una "corrente del Pacifico settentrionale" e una "corrente dell'Atlantico settentrionale".

Quest'ultima viene deviata in direzione sud dalle coste occidentali della Groenlandia - le gelide acque polari lambiscono il Labrador e Terranova; questa porzione viene dunque chiamata "corrente del Labrador". Essa incontra la corrente del Golfo a sud di Terranova, producendo una regione di frequenti nebbie e tempeste.

Le sponde occidentale e orientale dell'Oceano Atlantico formano un contrasto esemplare per comprendere il ruolo delle correnti. Il Labrador, sulla sponda occidentale, esposto alla corrente omonima, è una terra desolata, con una popolazione complessiva di 25 mila abitanti; sulla sponda orientale, invece, esattamente alle stesse latitudini, si trovano le isole britanniche, con una popolazione di 55 milioni di persone, e ciò grazie alla corrente del Golfo.

Una corrente che si muove esattamente lungo l'equatore non subisce l'effetto Coriolis e può procedere in linea retta. Una sottile corrente rettilinea di questo genere è stata individuata nell'Oceano Pacifico; essa si sposta lungo l'equatore, verso est, per parecchie migliaia di chilometri. È stata chiamata "corrente di Cromwell", dal nome del suo scopritore, l'oceanografo americano Townsend Cromwell.

Una corrente analoga, un poco più lenta, è stata scoperta nel 1961 nell'Atlantico dall'oceanografo americano Arthur D. Voorhis.

La circolazione comunque non si limita alle sole correnti superficiali: da parecchi indizi si desume che le profondità oceaniche non possono mantenersi in una quiete assoluta. Prima di tutto, le specie viventi nella zona superiore dei mari consumano di continuo le sostanze minerali di cui si nutrono - fosfati e nitrati - e, dopo la morte, le trasportano con sé in profondità; pertanto, se non vi fosse una circolazione delle acque a riportare verso l'alto tali sostanze, la superficie ne resterebbe priva. In secondo luogo, l'ossigeno di cui l'oceano si rifornisce assorbendolo dall'aria non penetrerebbe in profondità in misura sufficiente a mantenervi la vita, se non vi fosse una circolazione convettiva. In realtà, invece, si trova un'adeguata concentrazione di ossigeno perfino sul fondo delle fosse oceaniche, il che si può spiegare solo supponendo che in certe regioni dell'oceano le acque superficiali, ricche di ossigeno, si inabissino.

Il motore che aziona questa circolazione verticale è la differenza di temperatura. L'acqua superficiale si raffredda nelle regioni polari e perciò va a fondo: questo flusso continuo di acqua verso il basso si diffonde in tutto il bacino oceanico, così che perfino ai tropici l'acqua sul fondo è molto fredda, vicina al punto di congelamento.

Alla fine l'acqua fredda situata a grande profondità risale verso la superficie, sospinta da altre masse d'acqua fredda. Arrivata in superficie, essa si riscalda e si allontana dirigendosi verso l'Artico o l'Antartico, dove si inabissa nuovamente. Si stima che tale circolazione produrrebbe in circa mille anni un ricambio completo delle acque dell'Oceano Atlantico, se vi fosse immissione di

nuovo liquido. L'Oceano Pacifico, più grande ancora, verrebbe completamente rimescolato in circa duemila anni.

L'Antartico fornisce molta più acqua fredda di quanto non faccia l'Artico, il quale ha una calotta glaciale, compresa quella della Groenlandia, dieci volte più piccola. Le acque che circondano l'Antartide, rese freddissime dallo scioglimento dei ghiacci, si spingono verso nord restando in superficie, finché incontrano le acque calde provenienti dalle regioni tropicali. Le gelide acque antartiche, più dense di quelle calde tropicali, affondano al di sotto di queste ultime sulla linea della "convergenza antartica", che in certi punti si estende verso nord fino a raggiungere il quarantesimo parallelo.

Le fredde acque antartiche si distribuiscono sul fondo di tutto l'oceano, trasportando ossigeno (poiché questo, come tutti i gas, si scioglie più facilmente e in quantità maggiori in acque fredde che in acque calde) e sostanze nutritive. L'Antartico (la «ghiacciaia del mondo») rende quindi fertili gli oceani e controlla il clima di tutto il pianeta.

Le barriere continentali complicano questo quadro generale. Per seguire l'effettiva circolazione, gli oceanografi hanno fatto ricorso all'ossigeno come tracciante. Man mano che le acque polari, ricche di ossigeno, scendono e si diffondono, l'ossigeno diminuisce gradualmente a causa del consumo da parte dei vari organismi. Così, misurando la concentrazione di ossigeno in campioni di acqua prelevati in vari punti a grande profondità, si può tracciare una mappa dei percorsi delle correnti che circolano in profondità.

Questa mappa ha mostrato che una corrente principale scende dall'Oceano Artico lungo l'Atlantico, sotto alla corrente del Golfo e nella direzione opposta, mentre un'altra risale dall'Antartico attraverso l'Atlantico meridionale. L'Oceano Pacifico non riceve dall'Artico un apporto diretto degno di nota, perché l'unico passaggio che immetta in tale oceano è lo stretto di Bering, angusto e poco profondo; esso costituisce quindi il punto terminale della circolazione delle acque in profondità. Che il Pacifico settentrionale costituisca un vicolo cieco per il flusso globale lo dimostra anche il fatto che le sue acque profonde sono povere di ossigeno. Grandi porzioni di questo ampio oceano sono pertanto scarsamente popolate di forme di vita e sono l'equivalente di ciò che sulla terraferma sono le aree desertiche. Lo stesso si può dire dei mari quasi del tutto racchiusi dalle terre, come il Mediterraneo, in cui è parzialmente impedita la libera circolazione dell'ossigeno e delle sostanze nutritive.

Questo quadro della situazione delle correnti a grandi profondità è stato confermato nel 1957 da una spedizione oceanografica congiunta anglo-americana. I ricercatori fecero uso di uno speciale natante, ideato dall'oceanografo britannico John Crossley Swallow, e progettato per mantenersi alla profondità di 1500 metri o più. Il natante era fornito di un'apparecchiatura in grado di emettere onde sonore di breve lunghezza d'onda. Questi segnali permisero di seguire gli spostamenti del natante trascinato dalle correnti sottomarine. La spedizione poté in tal modo determinare il percorso di tali correnti lungo la costa occidentale dell'Atlantico.

LE RISORSE DELL'OCEANO.

Tutte queste informazioni acquisteranno importanza pratica quando la popolazione mondiale, in continua crescita, si rivolgerà all'oceano per aumentare le proprie risorse alimentari. Una «coltivazione del mare» che possa dirsi scientifica richiederà la conoscenza di queste correnti fertilizzanti, proprio come la coltivazione della terra richiede la conoscenza dei corsi d'acqua, delle falde sotterranee e del regime delle piogge. L'attuale raccolto di alimenti prodotti dal mare - circa 80 milioni di tonnellate nel 1980 - potrebbe essere aumentato, con una gestione attenta ed efficiente, fino a superare i 200 milioni di tonnellate all'anno (secondo le attuali stime), pur lasciando alle forme di vita marine il tempo di riprodursi adeguatamente. (Naturalmente presupposto di ciò è che cessi l'attuale inconsulto inquinamento dell'oceano, in modo particolare delle zone più vicine alle coste continentali che contengono e offrono agli esseri umani la più rilevante quantità di organismi

marini. Fino a oggi non solo non abbiamo realizzato un uso razionale del mare a scopo alimentare, ma stiamo anzi compromettendo la sua capacità di fornirci la quantità di cibo che ne ricaviamo attualmente.)

Il cibo non è l'unica risorsa importante dell'oceano. Le acque marine contengono in soluzione immense quantità di quasi tutti gli elementi. Non meno di quattro miliardi di tonnellate di uranio, di trecento milioni di tonnellate di argento e di quattro milioni di tonnellate di oro sono contenute negli oceani - ma in concentrazioni troppo ridotte perché l'estrazione sia praticamente conveniente. Tuttavia, oggi si ricavano dalle acque marine su scala commerciale magnesio e bromo. Inoltre, un'importante fonte di iodio sono le alghe marine essiccate, poiché le piante, mentre sono in vita, estraggono questo elemento dal mare, concentrandolo in una misura che al momento attuale non sarebbe conveniente raggiungere mediante procedimenti artificiali.

Dai mari si estraggono anche materiali assai più banali: dalle acque relativamente poco profonde che circondano gli Stati Uniti si ricavano ogni anno circa 20 milioni di tonnellate di gusci di ostriche, che costituiscono una preziosa fonte di calcare; inoltre ogni anno si dragano in modo analogo 40 milioni di metri cubi di sabbia e ghiaia. Le zone più profonde del fondale oceanico sono cosparse di noduli metallici aggregatisi intorno a un nucleo costituito da un ciottolo o magari da un dente di squalo (l'equivalente oceanico della formazione di una perla intorno a un granello di sabbia dentro un'ostrica). Di solito si parla di tali noduli come di noduli di manganese, perché sono particolarmente ricchi di questo metallo. Si stima che, sui fondali del Pacifico, ve ne siano 80 mila tonnellate per chilometro quadrato. Sarebbe veramente difficile raccoglierne in grandi quantitativi, e inoltre il contenuto di manganese, da solo, non renderebbe redditizia una simile impresa, nelle condizioni attuali. I noduli, però, contengono anche l'1 per cento di nichel, lo 0,5 per cento di rame e lo 0,5 per cento di cobalto e sono proprio questi componenti meno abbondanti a rendere assai più appetibile lo sfruttamento dei noduli.

Che dire poi del 97 per cento dell'oceano che è costituito esclusivamente da acqua?

Gli americani consumano ogni anno circa 2700 metri cubi di acqua a persona, per bere, per lavarsi e lavare, nell'agricoltura, nell'industria. Le altre nazioni sono in generale meno prodighe nei propri consumi, ma, su scala mondiale, l'impiego è di 1500 metri cubi a persona all'anno. Tutta questa acqua, però, deve essere acqua "dolce". L'acqua del mare, così com'è, non serve per nessuno di questi usi.

Naturalmente sulla Terra c'è, in assoluto, una grande quantità di acqua dolce. Meno del 3 per cento di tutta l'acqua esistente sulla terra è dolce, il che tuttavia significa ugualmente circa dieci milioni di metri cubi per persona. Certo, i tre quarti di tutta quest'acqua non sono disponibili per l'uso, perché sono imprigionati nelle calotte polari permanenti che ricoprono il 10 per cento della superficie solida terrestre.

L'acqua dolce esistente sulla terra allo stato liquido ammonta a circa 2,4 milioni di metri cubi a persona ed è continuamente reintegrata dall'acqua piovana, che ammonta a 0,11 milioni di metri cubi per persona. Se ne potrebbe concludere che le precipitazioni annue forniscono 75 volte la quantità di acqua usata dalla razza umana, e pertanto che l'acqua dolce è molto abbondante.

Tuttavia, la maggior parte della pioggia cade sull'oceano o scende sotto forma di neve sulla banchisa polare. Inoltre parte della pioggia che cade sulla terraferma e resta liquida, o diventa tale quando la temperatura aumenta, scorre verso il mare senza essere usata. Una grande quantità di acqua che cade sulle foreste della regione amazzonica praticamente non viene utilizzata affatto dagli uomini.

Intanto la popolazione umana cresce in continuazione e sta anche sempre più inquinando le riserve di acqua dolce esistenti.

Pertanto l'acqua dolce diventerà tra non molto tempo una merce rara, e l'umanità sta già cominciando a rivolgersi all'ultima fonte, l'oceano.

È possibile distillare l'acqua marina, facendola evaporare e poi ricondensare, in modo che si separi dalle sostanze disciolte; la soluzione migliore sarebbe di usare a tale scopo il calore del sole.

Queste procedure di "desalinizzazione" possono essere usate per ottenere acqua dolce; già oggi le si usa là dove si può contare su un'irradiazione solare continua, dove si dispone di combustibile non troppo costoso, o dove non c'è altra alternativa. I grandi transatlantici si riforniscono comunemente di acqua dolce distillando l'acqua del mare, e a questo scopo usano lo stesso combustibile che aziona i loro motori.

Qualcuno ha anche proposto di trascinare gruppi di iceberg dalle regioni polari fino ai porti delle regioni calde e aride, per utilizzare quanto resta del ghiaccio.

Indubbiamente, tuttavia, il miglior modo di sfruttare le nostre risorse di acqua dolce (come qualsiasi risorsa) è quello di conservarle accortamente, di ridurre al minimo lo sperpero e l'inquinamento e di cercare di limitare la popolazione umana della terra.

I fondali oceanici e le trasformazioni dei continenti.

Per quanto riguarda l'osservazione diretta degli abissi marini, sopravvive una sola testimonianza (non si sa quanto credibile) risalente all'antichità: il filosofo greco Posidonio avrebbe misurato, attorno al 100 avanti Cristo, la profondità del Mediterraneo al largo della Sardegna e avrebbe trovato una profondità di circa due chilometri.

Non fu comunque che nel diciottesimo secolo che gli scienziati cominciarono a studiare sistematicamente gli abissi marini allo scopo di conoscere le forme di vita esistenti nel mare. Nel terz'ultimo decennio del Settecento, un biologo danese, Otto Frederik Muller, ideò una draga capace di portare alla superficie, da parecchi metri di profondità, campioni di tali forme di vita.

A usare una draga con particolare successo fu il biologo inglese Edward Forbes junior, che, durante il terzo decennio dell'Ottocento, molto scoprì sulle forme di vita marina del Mare del Nord e degli altri bacini circostanti le isole britanniche. Poi, nel 1841, durante una spedizione navale nel Mediterraneo orientale, catturò una stella marina a una profondità di più di 400 metri.

I vegetali possono vivere solo nello strato superiore dell'oceano, perché la luce solare non penetra a profondità superiori a una settantina di metri. Ma gli animali, a loro volta, possono trarre alimento, in definitiva, solo dalle piante; pertanto Forbes pensò che la vita animale non potesse sussistere permanentemente sotto il livello al quale arriva la vita vegetale. Secondo Forbes il limite della vita marina era probabilmente a una profondità di 400 metri; a profondità maggiori, l'oceano doveva essere assolutamente privo di vita.

E invece, proprio nel periodo in cui Forbes era arrivato a tali conclusioni, l'esploratore britannico James Clark Ross, viaggiando lungo le coste dell'Antartide, estrasse forme di vita da una profondità di oltre 700 metri, assai sotto il limite stabilito da Forbes. Tuttavia, l'Antartide era molto lontana, e quasi tutti i biologi seguitarono a condividere le idee di Forbes.

Il fondo del mare diventò per la prima volta oggetto di interesse pratico per l'umanità (e non più solo motivo di curiosità intellettuale per pochi scienziati), quando si decise la posa di un cavo telegrafico attraverso l'Atlantico. Nel 1850, Maury aveva ormai approntato una mappa del fondo dell'Atlantico proprio per questo scopo; ci vollero quindici anni, contraddistinti da fallimenti e interruzioni, prima che l'impresa venisse effettivamente compiuta - sotto la guida veramente irriducibile del finanziatore statunitense Cyrus West Field, che profuse una fortuna in quest'impresa. Oggi più di venti cavi attraversano l'Atlantico.

Questa iniziativa, grazie a Maury, segnò l'inizio dell'esplorazione sistematica del fondo del mare. Dagli scandagli di Maury risultò che l'Oceano Atlantico era meno profondo al centro che vicino alle coste.

La regione centrale meno profonda venne denominata dall'oceanografo americano «Telegraph Plateau» in onore del cavo telegrafico.

La nave inglese "Bulldog" proseguì ed estese l'esplorazione del fondo marino iniziata da Maury; essa salpò nel 1860 con a bordo un medico inglese, George C. Wallich, che, mediante una draga, portò in superficie tredici stelle marine da una profondità di quasi 2300 metri. Non si trattava

di stelle marine andate a fondo dopo esser morte, ma di animali vivi e vegeti. Wallich riferì subito questa scoperta, sottolineando il fatto che la vita animale poteva esistere nel buio e nel freddo degli abissi marini, anche senza che vi fossero piante.

I biologi erano ancora riluttanti a credere a questa possibilità; ma un biologo scozzese, Charles W. Thomson, nel 1868 s'imbarcò sulla nave "Lightning" allo scopo di dragare le profondità dell'oceano, e catturò animali di tutti i tipi, mettendo così fine a ogni discussione. L'idea di Forbes che esistesse un limite inferiore al di sotto del quale non fosse possibile la vita marina fu così abbandonata definitivamente. Thomson voleva determinare con precisione la profondità dell'oceano, e con questo obiettivo prese il mare il 7 dicembre 1872 a bordo del "Challenger"; navigò per tre anni e mezzo, percorrendo complessivamente 125 mila chilometri. Per la misura delle profondità oceaniche, il "Challenger" non aveva altro sistema che quello di antica memoria consistente nel calare alcuni chilometri di cavo con un peso all'estremità, finché esso raggiungeva il fondo. Vennero fatte in tal modo più di 370 misure. Purtroppo, però, questa procedura non solo è incredibilmente laboriosa (per grandi profondità), ma è anche poco precisa. L'esplorazione dei fondali oceanici venne rivoluzionata nel 1922 con l'introduzione dell'"ecoscandaglio" che si avvale delle onde sonore; per spiegarne il funzionamento, è necessaria una breve digressione.

Le vibrazioni meccaniche originano nella materia (per esempio, nell'aria) onde longitudinali, alcune delle quali possono essere percepite come suoni. Al nostro orecchio le differenti lunghezze d'onda si presentano come suoni di differente altezza. Il suono più grave che udiamo ha una lunghezza d'onda di 22 metri e una frequenza di 15 cicli al secondo. Il suono più acuto che un adulto normale può percepire corrisponde a una lunghezza d'onda di 2,2 centimetri e a una frequenza di 15 mila cicli al secondo. (I bambini possono udire suoni leggermente più acuti.)

L'assorbimento del suono da parte dell'atmosfera dipende dalla lunghezza d'onda. Più grande è la lunghezza d'onda, minor assorbimento acustico si ha da parte di un dato spessore di aria. Per questa ragione, il suono delle sirene da nebbia è di tono molto basso, in modo da essere udito il più lontano possibile. La sirena di un grande transatlantico come la vecchia "Queen Mary" ha la frequenza di 27 vibrazioni al secondo, cioè circa la stessa della nota più bassa del pianoforte. Essa può essere udita a una distanza di circa 15 chilometri, e rivelata da un'opportuna strumentazione a una distanza che va da 150 a 250 chilometri.

Esistono inoltre dei suoni di tono più profondo di quanto noi siamo in grado di udire. Alcuni dei suoni che accompagnano i terremoti o le eruzioni vulcaniche appartengono proprio a tale intervallo degli "infrasuoni". Queste vibrazioni possono compiere il giro della terra, talora anche più di una volta, prima di venir completamente assorbite.

L'efficienza con cui viene riflesso un suono è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda: minore è la lunghezza dell'onda sonora, migliore è la riflessione. Onde sonore con frequenze superiori a quelle dei suoni più acuti che possiamo udire vengono riflesse ancora meglio. Alcuni animali sono in grado di udire suoni più acuti di quelli che udiamo noi, e si avvalgono di questa possibilità: i pipistrelli squittiscono emettendo onde sonore aventi frequenze "ultrasoniche" che arrivano a 130 mila cicli al secondo.

Dalla direzione in cui i suoni riflessi sono più forti e dal tempo impiegato dall'eco per tornare indietro, essi ricavano la posizione degli insetti da catturare e dei rami da evitare. È così che i pipistrelli sono in grado, anche se accecati, di volare con perfetta efficienza, al contrario di quanto accadrebbe se venissero privati dell'udito. (Il biologo italiano Lazzaro Spallanzani, che per primo fece questa osservazione nel 1793, si chiese se i pipistrelli vedessero con le orecchie, e, in un certo senso, si potrebbe rispondere di sì.)

Le focene, come i guacharo (uccelli che vivono nelle caverne del Venezuela), usano anch'essi i suoni come mezzi di localizzazione ("ecolocazione"). Poiché a questi animali serve individuare la posizione di oggetti più grossi, essi possono usare a questo scopo le onde sonore (meno efficienti) della regione udibile. (Oggi si comincia a sospettare che i suoni complessi emessi da focene e delfini, animali che possiedono cervelli molto grandi, possano essere usati per scopi di

comunicazione generale, cioè, in termini più espliciti, per parlare. Il biologo americano John C. Lilly ha indagato a fondo questa possibilità senza però arrivare a risultati conclusivi.)

Per far uso delle proprietà degli ultrasuoni, bisogna prima saperli produrre. Un esempio di produzione e utilizzo su piccola scala è il "fischietto per cani" (realizzato per la prima volta nel 1883). Esso produce un ultrasuono di frequenza poco superiore a quelle udibili, che infatti può essere avvertito dai cani ma non dagli esseri umani.

Una strada che offriva possibilità molto più ampie fu aperta dal chimico francese Pierre Curie e da suo fratello Jacques, i quali nel 1880 scoprirono che esercitando una pressione su certi cristalli si produceva una tensione elettrica ("piezoelettricità"). Si verificava anche l'inverso: applicando un potenziale elettrico a un cristallo di questo tipo si produceva una leggera contrazione, simile a quella prodotta da una pressione ("elettrostrizione"). Dopo lo sviluppo di una tecnica per produrre potenziali oscillanti molto rapidamente, fu possibile far vibrare i cristalli abbastanza velocemente da produrre ultrasuoni. Ciò venne realizzato per la prima volta nel 1917 dal fisico francese Paul Langevin, che applicò subito le eccellenti proprietà di riflessione di queste onde corte sonore all'individuazione dei sottomarini - nonostante che nel frattempo la prima guerra mondiale fosse finita. Durante la seconda guerra mondiale questo metodo venne perfezionato, e diede origine al "sonar" (dalle iniziali della espressione inglese «sound navigation and ranging», cioè apparecchiatura per la navigazione e la determinazione delle distanze mediante il suono).

La determinazione della profondità del mare in base alla riflessione di ultrasuoni sostituì il metodo dello scandaglio. L'intervallo di tempo fra l'invio di un segnale (un impulso brevissimo) e il ritorno della sua eco dà una misura della distanza del fondo. L'unico errore possibile è dovuto all'eventualità di una falsa eco, causata da un banco di pesci o da qualche altro ostacolo (ma proprio per questa ragione lo strumento è utile per le imbarcazioni da pesca).

Il metodo dell'ecoscandaglio, oltre a essere rapido e conveniente, consente anche di tracciare un profilo continuo del fondo al di sopra del quale la nave si sposta; in tal modo gli oceanografi stanno approntando un quadro generale della topografia sottomarina. In cinque minuti si possono raccogliere più dati di quanti il "Challenger" ne poteva ottenere in tutto un viaggio.

La prima imbarcazione che fece questo uso del sonar fu la nave oceanografica "Meteor", che studiò l'Oceano Atlantico nel 1922. Già nel 1925 era evidente che il fondale dell'oceano non era assolutamente piatto e uniforme, e che il Telegraph Plateau di Maury non era delimitato da dolci pendii, ma era anzi una vera e propria catena di montagne, più lunga e più accidentata di qualsiasi catena montuosa sulla terraferma. Essa si snodava attraverso tutta la lunghezza dell'Atlantico, e le sue vette più alte emergevano dalle acque sotto forma di isole, come le Azzorre, Ascensione e Tristan da Cunha. Tale catena venne denominata Dorsale medio-atlantica.

Con il passare del tempo si fecero altre scoperte sensazionali.

L'isola di Hawaii è la vetta di una montagna sottomarina alta 10 mila metri dalla sua base sommersa - più alta quindi di qualsiasi cima himalayana. Si può dunque dire che Hawaii sia la più alta montagna della terra. Vi sono anche numerosi coni a cima piatta, chiamati montagne sottomarine o "guyot", in onore del geografo svizzero-americano Arnold Henry Guyot, che introdusse la geografia scientifica negli Stati Uniti, quando vi immigrò nel 1848. Le montagne sottomarine furono scoperte durante la seconda guerra mondiale dal geologo americano Harry Hammond Hess, che ne individuò 19 in rapida successione. Ne esistono almeno 10 mila, soprattutto nel Pacifico; una di esse, scoperta nel 1964 immediatamente a sud dell'isola di Wake, è alta più di 4000 metri.

Vi sono poi le fosse oceaniche, profonde più di 6000 metri, in cui scomparirebbe anche il Grand Canyon. Esse sono tutte situate vicino agli arcipelaghi e coprono una superficie totale pari all'un per cento circa del fondale oceanico. Potrebbe sembrare poca cosa, ma in realtà si tratta di una superficie uguale alla metà degli Stati Uniti; inoltre le fosse contengono quindici volte la quantità di acqua di tutti i fiumi e i laghi del mondo. Le più profonde si trovano nel Pacifico, e corrono parallele agli arcipelaghi delle Filippine, delle Marianne, delle Kurili, delle Salomone e

delle Aleutine. Vi sono altre grandi fosse nell'Atlantico, al largo delle Antille e delle isole Sandwich del Sud, e ve ne è una nell'Oceano Indiano al largo dell'arcipelago indonesiano.

Oltre alle fosse, gli oceanografi hanno rilevato la presenza sul fondo oceanico di canyon, talvolta lunghi migliaia di chilometri, che assomigliano a letti di fiumi. Alcuni di questi sembrano essere veramente prolungamenti dei fiumi di terraferma - soprattutto un canyon che, a partire dalla foce del fiume Hudson, si addentra nell'Atlantico. Gli studi oceanografici dell'Oceano Indiano negli anni sessanta hanno individuato almeno una ventina di queste enormi incisioni solo nel golfo del Bengala. È attraente l'ipotesi che esse fossero un tempo letti di fiumi di terraferma, quando l'oceano era più basso di oggi. Alcuni di questi canali sottomarini, però, sono talmente al di sotto dell'attuale livello del mare che è del tutto inverosimile che siano mai stati fuori dall'oceano. Recentemente vari oceanografi - soprattutto William Maurice Ewing e Bruce Charles Heezen - hanno avanzato un'altra teoria: che i canyon subacquei siano stati scavati da flussi turbolenti ("correnti di torbidità") di acqua carica di terra, che si sarebbe precipitata lungo le scarpate continentali con velocità fino a 100 chilometri all'ora. Una corrente del genere, che richiamò sul problema l'attenzione degli scienziati, si verificò nel 1929 dopo un terremoto al largo di Terranova, strappando parecchi cavi e creando non poche difficoltà.

La Dorsale medio-atlantica continuò a riservare sorprese; ulteriori scandagli condotti in altri punti mostrarono che essa andava al di là dell'Atlantico: raggiuntane l'estremità meridionale, girava intorno all'Africa dirigendosi poi, attraverso la parte occidentale dell'Oceano Indiano, verso l'Arabia. Nell'Oceano Indiano centrale essa si biforcava, continuando a sud dell'Australia e della Nuova Zelanda e poi si dirigeva verso nord, descrivendo così un ampio cerchio tutto attorno all'Oceano Pacifico. Quella che era stata ritenuta una dorsale atlantica si rivelò una dorsale oceanica generale. Inoltre, sotto un aspetto abbastanza fondamentale, essa differisce dalle catene montuose situate sui continenti: mentre quest'ultime sono formate dal corrugamento delle rocce sedimentarie, l'immensa catena oceanica è fatta di basalto, spinto verso l'alto dagli strati inferiori, che hanno temperature altissime.

Dopo la seconda guerra mondiale, il fondale oceanico venne studiato nei particolari con rinnovata energia da Ewing e Heezen. Scandagli accurati effettuati nel 1953 mostrarono, con grande stupore dei due studiosi, che un profondo canyon correva lungo tutta la dorsale, proprio nella sua zona centrale; alla fine ci si rese conto che questo canyon era presente in tutti i segmenti della Dorsale medio-oceanica, tanto che talora viene chiamato Grande Rift (fenditura) Globale. In alcuni luoghi esso si avvicina molto alla terraferma: esso risale lungo tutto il Mar Rosso tra l'Africa e l'Arabia, sfiora le sponde del Pacifico nel golfo di California e risale lungo le coste dello stato della California.

Sulle prime, sembrò che il Rift potesse essere continuo, una frattura lunga 65 mila chilometri nella crosta terrestre. Tuttavia, uno studio più attento mostrò che esso è formato da brevi segmenti diritti, separati l'uno dall'altro come se delle scosse sismiche avessero distanziato ogni sezione da quella contigua. In effetti, è proprio lungo il Rift che si è notata una maggior frequenza di scosse telluriche di fenomeni vulcanici.

Il Rift rappresenta quindi un punto debole attraverso il quale roccia fusa caldissima ("magma") sgorga lentamente dall'interno della terra, si raffredda e si accumula formando la dorsale, per poi diffondersi ulteriormente. Tale diffusione può raggiungere la velocità di 16 centimetri all'anno; quindi l'intero fondale dell'Oceano Pacifico potrebbe venir ricoperto di un nuovo strato in 100 milioni di anni. I sedimenti estratti dai fondali oceanici, effettivamente, sono risultati raramente più antichi di tale data, il che non è privo di significato dato che il nostro pianeta ha una vita lunga quarantacinque volte tanto. Per una spiegazione, si deve ricorrere al concetto di "espansione del fondale marino".

Si comprese ben presto che la crosta terrestre è divisa in grandi zolle (o placche), separate l'una dall'altra dal Grande Rift Globale e dalle sue diramazioni. Tali placche sono state denominate "zolle tettoniche", da una parola greca che significa «carpentiere», perché esse apparivano connesse

con molta arte, in modo da formare una crosta apparentemente priva di discontinuità. Lo studio dell'evoluzione della crosta terrestre in funzione di queste zolle ha quindi preso il nome di "tettonica a zolle".

Esistono sei grandi zolle tettoniche e parecchie altre più piccole; ben presto fu evidente che i terremoti avvengono di solito lungo i loro margini. Ai margini della zolla del Pacifico (che include la maggior parte di tale oceano) si trovano, per esempio, le zone sismiche delle Indie orientali, delle isole giapponesi, dell'Alaska e della California, e così via. La frontiera mediterranea tra le zolle eurasiatica e africana è seconda solo a quella del Pacifico quanto a memorabili terremoti.

Inoltre, anche le "faglie" che erano state scoperte nella crosta terrestre, cioè le profonde fessure nelle quali le rocce situate su un versante possono periodicamente scorrere contro quelle situate sull'altro versante, producendo i terremoti, erano situate - si scoprì ben presto - sul margine tra zolla e zolla e sulle ramificazioni di tali margini. La più famosa di queste faglie, quella di Sant'Andrea, che corre lungo tutta la costa della California, da San Francisco a Los Angeles, fa parte del margine tra la zolla americana e quella del Pacifico.

Cosa si può dire, allora, della deriva dei continenti di Wegener? Se si considera una sola zolla, è chiaro che gli oggetti che si trovano su di essa non possono cambiare di posizione o andare alla deriva; essi sono tenuti fissi dalla rigidità del basalto (come avevano fatto osservare gli oppositori di Wegener). Inoltre, anche le zolle contigue risultano incastrate l'una nell'altra così rigidamente, che era difficile immaginare che qualcosa potesse farle spostare.

La soluzione venne da un'altra considerazione. In corrispondenza delle frontiere tra zolla e zolla non soltanto si verificano con frequenza terremoti, ma sono anche numerosi i vulcani. In effetti le coste del Pacifico, che seguono da vicino il margine della rispettiva zolla, sono talmente costellate di vulcani, attivi o no, che a tutta la zona è stato dato il nome di "cerchio di fuoco".

Non potrebbe allora darsi che il magma sgorghi dagli strati profondi e caldi della terra, aprendosi un varco attraverso le fratture esistenti tra una zolla tettonica e l'altra, fratture che rappresentano quindi dei punti deboli nella crosta terrestre, per il resto compatta? In particolare, potrebbe darsi che il magma fluisca verso l'alto sgorgando con molta lentezza attraverso il Rift medio-atlantico, e solidificandosi poi a contatto delle acque dell'oceano, in modo da formare, su entrambi i bordi del Rift, la Dorsale medio-atlantica.

Possiamo spingerci oltre: forse il magma, salendo in superficie e solidificandosi, ha esercitato una pressione che ha allontanato l'una dall'altra le zolle; in tal caso, esso sarebbe riuscito a far distanziare l'Africa e l'America meridionale a sud, l'Europa e l'America settentrionale a nord, spezzando così Pangea e dando origine all'Oceano Atlantico, che in seguito si sarebbe sempre più ampliato.

Anche Europa e Africa si sarebbero allontanate in questo modo, dando luogo alla formazione del Mediterraneo e del Mar Rosso. Dal momento che il fondo dell'oceano si sarebbe, come conseguenza, ampliato, questo effetto è stato chiamato "espansione del fondale marino" ed è stato ipotizzato per la prima volta da H. H. Hess e Robert S. Dietz, nel 1960. I continenti dunque non galleggiano, né si allontanano andando alla deriva, come aveva pensato Wegener, ma, secondo questa ipotesi, sono solidali con le zolle, che vengono allontanate a forza.

Come era possibile dimostrare la dilatazione del fondale marino? A cominciare dal 1963 si studiarono le proprietà magnetiche di rocce prelevate dai fondali oceanici sui due lati del Rift medio-atlantico.

La distribuzione di tali proprietà variava con la distanza dallo stesso Rift, presentando però una simmetria perfetta, come in un'immagine speculare, fra un versante e l'altro. Era evidente che tali rocce erano più giovani vicino al Rift, mentre diventavano gradualmente più vecchie via via che ci si allontanava dai lati della frattura.

Si è potuto in questo modo stimare che, attualmente, il fondale dell'Atlantico si sta dilatando di poco meno di 2,5 centimetri all'anno; su tale base si è potuta determinare approssimativamente l'epoca in cui cominciò a formarsi l'Oceano Atlantico. Sotto questo aspetto, come sotto altri, lo

studio delle zolle tettoniche e dei loro spostamenti ha completamente rivoluzionato la geologia negli ultimi venti anni.

Naturalmente, se due zolle vengono allontanate a forza, ciascuna di esse deve essere compressa contro un'altra dalla parte opposta, dato che le zolle sono perfettamente incastrate l'una nell'altra. Quando due zolle si avvicinano lentamente (alla velocità di non più di 5 centimetri circa all'anno), la crosta si deforma e si corruga in su e in giù, formando le montagne e le loro "radici". Così, sembra che la catena dell'Himalaya si sia formata quando la zolla che sostiene l'India è entrata lentamente in contatto con la zolla che regge il resto dell'Asia.

Quando, invece, due zolle si avvicinano con troppa rapidità per consentire che si produca un corrugamento, la superficie di una di esse può infilarsi sotto la superficie dell'altra, formando una profonda fossa, una fila di isole e favorendo l'attività vulcanica. Fosse ed isole così disposte caratterizzano, per esempio, il Pacifico occidentale.

Le zolle si allontanano per effetto della dilatazione del fondale marino; per la stessa ragione in altri casi vanno ravvicinandosi l'una all'altra. Il Rift attraversa l'Islanda occidentale, che sta spezzandosi, anche se molto lentamente. Un'altra zona in cui si sta verificando un allontanamento è il Mar Rosso, un mare relativamente giovane, che deve la sua esistenza al fatto che l'Africa e l'Arabia si sono già alquanto allontanate l'una dall'altra; infatti, se si immagina di accostare le loro coste, esse combaciano molto bene.

Questo processo è tuttora in corso, così che, in un certo senso, il Mar Rosso si può considerare come un nuovo oceano in via di formazione. La presenza di un fenomeno attivo di emersione del magma nel Mar Rosso è indicata dal fatto che sul fondo di quel mare vi sono delle zone che raggiungono una temperatura di 56 gradi C e una concentrazione salina almeno quintupla della norma, come è stato scoperto nel 1965.

Presumibilmente, c'è stato un ciclo lungo e molto lento in cui il magma risaliva verso la superficie obbligando in certe zone le zolle a distanziarsi, mentre altrove le zolle venivano a contatto tra loro, spingendo la crosta verso il basso e trasformandola nuovamente in magma. Nel corso di questo processo i continenti si sono riuniti formando un'unica massa di terra, e in seguito sono tornati a staccarsi, non una sola volta, ma più volte, mentre montagne si formavano e venivano cancellate, abissi oceanici si aprivano e venivano colmati, vulcani nascevano e si estinguevano. La terra è viva dal punto di vista geologico, non meno che da quello biologico.

I geologi oggi possono perfino ricostruire il corso dell'ultima suddivisione di Pangea, anche se ancora in maniera approssimativa. Una prima frattura si verificò seguendo una linea est-ovest. La metà settentrionale di Pangea - che comprendeva quelle che oggi sono l'America del Nord, l'Europa e l'Asia - viene talora chiamata Laurasia, perché le rocce di superficie geologicamente più antiche del Nordamerica sono quelle delle Laurentian Highlands, a nord del fiume San Lorenzo.

La metà meridionale - che comprendeva quelle che oggi sono l'America del Sud, l'Africa, l'India, l'Australia e l'Antartide - viene chiamata Gondwana (un nome inventato nell'ultimo decennio del secolo scorso da un geologo austriaco, Edward Suess, il quale lo prese a prestito da una regione dell'India e lo inserì in una teoria dell'evoluzione geologica che a quei tempi sembrò ragionevole, mentre oggi è risultata erronea).

Circa 200 milioni di anni orsono, cominciò l'allontanamento del Nordamerica dall'Eurasia; e 150 milioni di anni orsono, il Sudamerica cominciò ad allontanarsi dall'Africa - e infine i due continenti si saldarono mediante l'America centrale. Le masse continentali vennero sospinte verso nord nel corso della loro separazione, finché le due metà di Laurasia finirono per cingere la regione artica.

Circa 110 milioni di anni orsono la porzione orientale di Gondwana si spezzò in più frammenti: il Madagascar, l'India, l'Antartide e l'Australia. Il Madagascar restò molto vicino all'Africa, mentre l'India si allontanò più di quanto avesse fatto qualsiasi altra massa di terra fin dall'inizio dell'ultima suddivisione di Pangea: essa si spostò di 8800 chilometri verso nord,

saldandosi con l'Asia meridionale e formando le montagne dell'Himalaya, il Pamir e l'altopiano tibetano - l'area montuosa più giovane ed estesa che esista sulla terra, e anche la più suggestiva.

È probabile che Antartide e Australia si siano separate soltanto 40 milioni di anni fa: l'Antartide si spostò verso sud, andando incontro al suo gelido destino; l'Australia si sta tuttora spostando verso nord.

LA VITA NEGLI ABISSI MARINI.

Dopo la seconda guerra mondiale l'esplorazione degli abissi marini non ha conosciuto soste. Un apparecchio per l'ascolto subacqueo, l'"idrofono", ha mostrato negli ultimi anni che le creature marine grugniscono, emettono suoni lamentosi, gridi o schiocchi e in generale fanno degli abissi oceanici un luogo ancor più incredibilmente rumoroso della terraferma.

Un nuovo "Challenger" sondò la fossa delle Marianne nel Pacifico occidentale nel 1951 e trovò che essa (e non la fossa al largo delle Filippine) era lo squarcio più profondo della crosta terrestre; oggi la sua zona più profonda viene chiamata "Challenger Deep"; essa si inabissa fino a 11 mila metri, tanto che, se vi venisse immerso il Monte Everest, la sua vetta sarebbe coperta da più di due chilometri di acqua. Eppure il Challenger portò a galla dal fondo degli abissi dei batteri apparentemente molto simili a quelli che vivono in superficie, che però non possono vivere a una pressione minore di 1000 atmosfere!

Le creature delle fosse sono talmente adattate alle grandi pressioni di questi abissi che non ne possono uscire; in pratica, vi sono imprigionate come in un'isola. Hanno subìto un'evoluzione separata; tuttavia, hanno con altri organismi sufficienti affinità per far pensare che la loro evoluzione negli abissi non risalga a troppo tempo fa. Si può immaginare che certi gruppi di creature oceaniche siano stati obbligati a vivere a profondità ancora maggiori della pressione competitiva, così come altri gruppi sono stati obbligati a vivere in zone situate più in alto, all'altezza della piattaforma continentale, finché emersero sulla terraferma. Mentre i primi si sono dovuti adattare alle alte pressioni, i secondi si sono dovuti adattare all'assenza di acqua. Tutto considerato, è stato forse quest'ultimo l'adattamento più difficile da compiersi; pertanto non ci si dovrebbe meravigliare dell'esistenza della vita negli abissi marini.

La vita in questi abissi è sicuramente meno rigogliosa che nelle zone più prossime alla superficie. La densità di materia vivente per unità di volume al di sotto dei 7 chilometri di profondità è solo un decimo di quella che si stima esservi a 3 chilometri. Inoltre sotto ai 7 chilometri i carnivori sono scarsi, o forse del tutto inesistenti, dato che non vi sono prede sufficienti a nutrirli. Abbondano invece i saprofiti, che mangiano qualsiasi sostanza organica riescano a trovare. Si può desumere quanto sia recente la colonizzazione degli abissi dal fatto che nessuna delle specie ivi trovate si è sviluppata prima di 200 milioni di anni fa, mentre la maggior parte ha una storia di non più di 50 milioni di anni. È solo all'inizio dell'era dei dinosauri che le zone più profonde dell'oceano, fino ad allora prive di organismi, sono state definitivamente conquistate dalla vita.

Tuttavia, alcuni degli organismi che popolarono gli abissi marini vi sono sopravvissuti, mentre i loro parenti più prossimi alla superficie si sono estinti: ciò fu dimostrato in modo spettacolare verso la fine degli anni trenta. Il 25 dicembre 1938, un peschereccio catturò al largo del Sudafrica uno strano pesce lungo circa un metro e mezzo. La strana caratteristica di questo pesce era che le sue pinne erano attaccate a dei lobi carnosi anziché direttamente al corpo. Uno zoologo sudafricano, J. L. B. Smith, che ebbe la fortuna di poterlo esaminare, si rese conto che si trattava di un impareggiabile regalo di Natale. Era un "celacantide", un pesce primordiale ritenuto dagli zoologi estinto da 70 milioni di anni, un esemplare di una specie che si pensava scomparsa dalla terra prima che essa divenisse il regno dei dinosauri.

La seconda guerra mondiale interruppe la ricerca di altri celacanti, ma nel 1952 ne fu pescato un secondo, di un genere differente, al largo del Madagascar. Successivamente ne sono stati

trovati parecchi altri. Essendo adattato alla vita in acque abbastanza profonde, il celacanto muore poco dopo essere stato portato in superficie.

Gli evoluzionisti hanno studiato con particolare interesse gli esemplari di celacanto perché è da questo pesce che si sono evoluti i primi anfibi; in altri termini, il celacanto è un discendente diretto dei nostri progenitori acquatici.

Una scoperta ancora più emozionante fu fatta alla fine degli anni settanta: sul fondale oceanico vi sono dei "punti caldi" in cui il magma bollente del mantello risale insolitamente vicino al limite superiore della crosta e riscalda l'acqua sovrastante.

Dal 1977, a bordo di un sottomarino progettato per grandi profondità, alcuni scienziati incominciarono a studiare il fondale marino nelle vicinanze dei punti caldi a est delle isole Galapagos e all'imboccatura del golfo di California. In quest'ultimo punto, gli scienziati scoprirono dei camini, dai quali salgono verso l'alto fiotti bollenti di fango e fumi, che saturano le acque circostanti di sostanze minerali.

Si tratta di minerali ricchi di zolfo; così, le zone vicine a questi punti caldi sono ricche di specie di batteri che traggono l'energia loro necessaria da reazioni chimiche in cui intervengono zolfo e calore, anziché dalla luce solare. Di questi batteri si nutrono alcuni animali di piccole dimensioni che, a loro volta, rappresentano il cibo di animali più grandi.

Ci si trovò così di fronte a una catena di forme viventi del tutto nuova, in quanto non dipendeva dalle cellule vegetali degli strati superiori del mare. Anche in totale assenza della luce solare, questa catena potrebbe esistere, purché dall'interno della terra seguitasse questo flusso verso l'alto di calore e minerali; pertanto questa catena vitale può esistere solo vicino ai punti caldi.

Molluschi bivalvi, granchi, vermi di vario tipo, alcuni anche piuttosto grandi, furono recuperati in queste zone del fondale marino e successivamente studiati. Essi prosperavano in acque che risulterebbero letali per qualsiasi specie non adattata al particolare ambiente chimico locale.

IMMERSIONI A GRANDE PROFONDITÀ.

Quanto si è detto conferma che il modo ideale di studiare gli abissi marini consiste nell'andare direttamente sul posto; ma l'acqua, ovviamente, non è un ambiente molto adatto per noi. Fin dall'antichità vi sono stati uomini che hanno messo alla prova le proprie capacità, riuscendo a scendere fino a una ventina di metri sott'acqua e a restare in immersione anche per un paio di minuti. Ma senza aiuto il corpo umano non può migliorare di molto queste prestazioni.

Negli anni trenta, occhialoni, pinne di gomma e boccagli (brevi tubi, di cui un'estremità vien tenuta in bocca mentre l'altra emerge sopra il pelo dell'acqua) consentirono di nuotare sott'acqua per tempi più lunghi e con disinvoltura. Si trattava ancora soltanto di "immersioni subacquee a piccola profondità", di poco sotto alla superficie del mare.

Nel 1943, l'ufficiale della Marina francese Jacques Yves Cousteau ideò un nuovo sistema per migliorare l'immersione. Esso consisteva nel munirsi di un cilindro di aria compressa, che, una volta espirata, poteva essere riciclata e resa nuovamente respirabile, facendola circolare attraverso sostanze chimiche che assorbivano l'anidride carbonica. Era nato così l'"autorespiratore", e con esso lo sport dell'immersione subacquea, che ebbe grande diffusione dopo la guerra (in inglese fu chiamato "scuba diving", dove la parola "scuba" è un'abbreviazione di «self-contained underwater breathing apparatus», cioè «apparecchiatura autosufficiente per la respirazione subacquea»).

Un «sub» esperto può raggiungere una profondità di 60 metri, che però è ancora molto poco se si pensa alla profondità dell'oceano.

Il primo scafandro praticamente utilizzabile fu progettato nel 1830 da Augustus Siebe. Oggi, con uno scafandro moderno, si può scendere fino alla profondità di una novantina di metri. Lo scafandro racchiude completamente il corpo umano, ma si può pensare a qualcosa di più efficiente: un'imbarcazione adatta agli spostamenti subacquei, insomma un sottomarino.

Un primo sottomarino effettivamente capace di rimanere sott'acqua per un tempo ragionevole senza che la persona al suo interno perisse era stato costruito già nel 1620 da un inventore olandese, Cornelis Drebbel. Tuttavia, perché un sommergibile fosse di utilità pratica, doveva essere azionato da qualcosa di diverso da un'elica mossa a mano. La forza motrice del vapore non poteva essere utilizzata in questo caso, perché il combustibile non può essere bruciato nell'ambiente chiuso e povero di aria di un sottomarino. Occorreva un motore azionato dall'elettricità di un accumulatore.

Un sommergibile elettrico fu costruito per la prima volta nel 1886. La batteria doveva essere ricaricata periodicamente, ma lo spazio che poteva esser percorso tra una carica e l'altra si aggirava sui 130 chilometri. Quando scoppiò la prima guerra mondiale tutte le maggiori potenze europee avevano i propri sottomarini, che usarono nelle azioni belliche. Tuttavia, questi primi sommergibili non erano molto robusti e non potevano scendere a grandi profondità.

Nel 1934 Charles William Beebe riuscì a scendere fino a 900 metri di profondità nella sua "batisfera", una piccola imbarcazione dalle pareti molto spesse, dotata di riserve di ossigeno e di prodotti chimici atti ad assorbire l'anidride carbonica.

La batisfera era una cabina incapace di muoversi, collegata a un battello di superficie mediante un cavo (dalla cui integrità dipendeva la sopravvivenza). Occorreva invece un'imbarcazione manovrabile negli abissi; un mezzo con tali caratteristiche, il "batiscafo", fu inventato nel 1947 dal fisico svizzero Auguste Piccard. Costruito per resistere a enormi pressioni, faceva uso di una pesante zavorra di palline di ferro (rapidamente sganciabile in caso di emergenza) per scendere, e di un «pallone» contenente benzina (più leggera dell'acqua) per galleggiare e mantenere la stabilità. Nella prima prova, effettuata nel 1948 al largo di Dakar, nell'Africa occidentale, il batiscafo (senza uomini a bordo) scese fino a quasi 1400 metri. In quello stesso anno anche un collaboratore di Beebe, Otis Barton, s'immerse fino a circa 1400 metri di profondità facendo uso di una batisfera modificata, chiamata "bentoscopio".

In seguito Piccard, con il figlio Jacques, costruì una versione migliorata del batiscafo, che battezzò "Trieste" in quanto quella città aveva contribuito a finanziarne la costruzione. Nel 1953 Piccard discese fino a 4000 metri nelle acque del Mediterraneo.

Il "Trieste" venne acquistato dalla Marina degli Stati Uniti per fini di ricerca. Il 14 gennaio 1960, Jacques Piccard e un ufficiale di Marina, Don Walsh, lo portarono fino al fondo della fossa delle Marianne, scendendo nell'abisso più profondo della terra, a oltre 11000 metri sotto il livello del mare. Laggiù, nonostante la pressione di 1100 atmosfere, essi trovarono correnti marine ed esseri viventi.

La prima creatura che avvistarono fu un vertebrato, una specie di pesce-passera, lungo una trentina di centimetri e provvisto di occhi. Nel 1964, il batiscafo "Archimede", di proprietà francese, compì tre viaggi sul fondo della fossa di Portorico, che, con i suoi 8500 metri, è l'abisso più profondo dell'Atlantico. Anche laggiù ogni decimetro quadrato di fondale aveva le sue forme di vita. Cosa abbastanza strana, il fondo non scendeva gradualmente verso l'abisso, ma sembrava terrazzato, come una gigantesca e larghissima scalinata.

LE CALOTTE POLARI.

Le regioni più estreme del nostro pianeta hanno sempre affascinato gli esseri umani, e uno dei capitoli più avventurosi della storia della scienza è stata l'esplorazione delle regioni polari. Queste regioni sono ricche di fascino, di fenomeni spettacolari, e cruciali per l'umanità: le straordinarie aurore boreali, il freddo estremo e soprattutto le immense calotte di ghiaccio, che sono determinanti per il clima del pianeta e per il nostro modo di vivere.

L'impulso a raggiungere i poli sorse piuttosto tardi nella storia dell'umanità. Esso ebbe inizio nell'epoca delle grandi esplorazioni, dopo la scoperta dell'America da parte di Cristoforo Colombo. I primi esploratori artici andavano soprattutto alla ricerca di una rotta che permettesse di

circumnavigare l'estremità settentrionale del continente americano. Inseguendo questo miraggio, il navigatore inglese Henry Hudson (al servizio del governo olandese) trovò la baia che prese il suo nome, e al tempo stesso la morte, nel 1610. Sei anni più tardi un altro navigatore inglese, William Baffin, scoprì quella che venne poi chiamata baia di Baffin, spingendosi fino a 1300 chilometri dal polo nord. Infine, negli anni dal 1846 al 1848, l'esploratore britannico John Franklin si aprì una strada lungo la costa settentrionale del Canada e scoprì il Passaggio di Nordovest (che allora era assolutamente inutilizzabile per le navi). Questa impresa gli costò la vita.

Seguì un mezzo secolo di sforzi per raggiungere il polo nord, motivati in gran parte da puro spirito d'avventura e dal desiderio di essere i primi ad arrivarvi. Nel 1873 gli esploratori austriaci Julius Payer e Carl Weyprecht si spinsero fino a mille chilometri circa dal polo e diedero a un gruppo di isole da loro scoperte il nome di Terra di Francesco Giuseppe, in onore dell'imperatore austriaco di quel tempo. Nel 1896 l'esploratore norvegese Fridtjof Nansen riuscì a farsi trasportare dal ghiaccio artico fino a 500 chilometri dal polo. Infine, il 6 aprile 1909, l'esploratore americano Robert Edwin Peary raggiunse il polo stesso.

Oggigiorno il polo nord ha perso quasi tutto il suo alone di mistero: esso è ormai stato esplorato sopra il ghiaccio, dall'aria e sott'acqua. Richard Evelyn Byrd e Floyd Bennett furono i primi a sorvolarlo, nel 1926, e diversi sottomarini hanno solcato le sue acque.

Nel frattempo, la più estesa calotta di ghiaccio delle regioni artiche, che ha il suo centro nella Groenlandia, ha attirato numerose spedizioni scientifiche. Wegener morì nel corso di una di queste spedizioni nel novembre del 1930. Si è constatato che il ghiacciaio copre circa 1700000 dei 2175000 chilometri quadrati di superficie dell'isola, e che in certi punti esso raggiunge uno spessore di oltre 1500 metri.

I ghiacci, accumulandosi, vengono sospinti in mare, dove il loro bordo si spezza, dando origine agli iceberg. In tal modo nell'emisfero settentrionale si formano ogni anno circa 16 mila iceberg, il 90 per cento dei quali staccatisi dalla calotta groenlandese. Essi si spostano lentamente verso sud, soprattutto discendendo lungo l'Atlantico occidentale. Circa 400 iceberg all'anno oltrepassano l'isola di Terranova, minacciando le rotte di navigazione; tra il 1870 e il 1890 quattordici navi furono affondate e quaranta danneggiate dalla collisione con gli iceberg.

Il fatto più drammatico avvenne nel 1912, allorché, durante il suo viaggio inaugurale, il lussuoso transatlantico "Titanic" urtò contro un iceberg e colò a picco. Da allora è stato istituito un servizio internazionale di vigilanza sulle posizioni di questi mostri senza vita, e, da quando tale servizio ("Ice Patrol") è operante, non ci sono più stati affondamenti di navi a causa degli iceberg.

IL POLO SUD. L'ANTARTIDE.

Il grande ghiacciaio continentale del polo sud è molto più grande della Groenlandia. La calotta antartica ricopre un'area che è sette volte quella del ghiacciaio groenlandese, con uno spessore medio di circa due chilometri e mezzo, che raggiunge in certi punti anche i cinque chilometri. Tutto ciò è dovuto alle enormi dimensioni del continente antartico: circa 13 milioni di chilometri quadrati; è tuttavia ancora incerto quanta parte di tale superficie sia formata da terra e quanta da mare coperto di ghiacci. Alcuni esploratori ritengono che almeno la parte occidentale dell'Antartide sia formata da un gruppo di grandi isole collegate dal ghiaccio, ma attualmente sembra prevalere la teoria che si tratti di un continente.

Il celebre esploratore inglese James Cook (più noto come Capitano Cook) fu il primo europeo che attraversò il circolo polare antartico. Nel 1773, egli compì la circumnavigazione delle regioni antartiche. (Fu forse questo viaggio che ispirò a Samuel Taylor Coleridge "The Rime of the Ancient Mariner"; il poema, pubblicato nel 1798, descriveva un viaggio dall'Atlantico al Pacifico attraverso le regioni ghiacciate dell'Antartide.)

Nel 1819, l'esploratore britannico Williams Smith scoprì le isole Shetland australi, distanti appena 80 chilometri dalla costa dell'Antartide; nel 1821 una spedizione russa, diretta da Fabian

Gottlieb Bellingshausen, avvistò un'isoletta (isola di Pietro Primo) all'interno del circolo polare antartico; nello stesso anno l'inglese George Powell e l'americano Nathaniel B. Palmer giunsero per la prima volta in vista del continente antartico in particolare della penisola oggi chiamata penisola Antartica.

Nei decenni che seguirono, gli esploratori si spinsero sempre più vicino al polo sud. Nel 1840 l'ufficiale di Marina americano Charles Wilkes dichiarò che le terre avvistate facevano parte di una massa continentale; in seguito i fatti gli diedero ragione. L'inglese James Weddell si addentrò in un braccio di mare a est della penisola Antartica (oggi chiamata mare di Weddell), spingendosi fino a 1400 chilometri dal polo. Un altro esploratore inglese, James Clark Ross, scoprì l'altra grande insenatura dell'Antartide (oggi chiamata mare di Ross), arrivando a soli 1100 chilometri dal polo. Tra il 1902 e il 1904 un terzo esploratore britannico, Robert Falcon Scott, viaggiò sul Ross Ice Shelf (un tratto di oceano ricoperto di ghiacci, grande come il Texas), arrivando a 800 chilometri dal polo. Infine, nel 1909, ancora un altro inglese, Ernest Shackleton, attraversò i ghiacci arrivando a circa 160 chilometri dal polo.

Il 16 dicembre 1911 la meta fu finalmente raggiunta dall'esploratore norvegese Roald Amundsen. Scott, compiendo un secondo tentativo, arrivò al polo sud esattamente tre settimane dopo, solo per trovarvi issata la bandiera di Amundsen. Scott e i suoi uomini morirono durante il viaggio di ritorno.

Sul finire degli anni venti, gli aerei contribuirono alla conquista definitiva dell'Antartide. L'esploratore australiano George Hubert Wilkins sorvolò quasi duemila chilometri delle sue coste e Richard Evelyn Bird, nel 1929, sorvolò il polo sud. Nel frattempo era stata installata nell'Antartide la prima base, Little America Prima.

L'ANNO GEOFISICO INTERNAZIONALE.

Le regioni polari boreale e australe divennero i punti focali del più importante progetto scientifico internazionale dei tempi moderni. Esso ebbe origine nel 1882-83, quando varie nazioni parteciparono all'Anno Polare Internazionale per l'esplorazione e l'indagine scientifica di fenomeni come le aurore boreali e il magnetismo terrestre. Il progetto ebbe un tale successo che venne ripetuto negli anni 1932-33, con un secondo Anno Polare Internazionale. Nel 1950 il geofisico statunitense Lloyd Berkner (che aveva fatto parte della prima spedizione Byrd nell'Antartide) propose un terzo anno, e la proposta fu accettata con entusiasmo dal Consiglio Internazionale delle Associazioni Scientifiche. Questa volta gli scienziati erano forniti di nuove e potenti apparecchiature di ricerca e ansiosi di rispondere a una serie di domande nuove - sui raggi cosmici, sugli strati superiori dell'atmosfera, sugli abissi marini, perfino sulle possibilità di esplorare lo spazio esterno. Fu organizzato un ambizioso Anno Geofisico Internazionale (IGY, International Geophysical Year), e fu scelto il periodo dal primo luglio 1957 al 31 dicembre 1958 (un periodo di massima attività delle macchie solari). L'impresa ottenne una cordiale collaborazione internazionale e perfino i protagonisti della guerra fredda, l'Unione Sovietica e gli Stati Uniti, fecero in modo di seppellire l'ascia di guerra per amore della scienza.

Anche se la conquista più spettacolare dell'IGY, agli occhi del pubblico, fu il successo nel lancio di satelliti artificiali da parte dell'Unione Sovietica e degli Stati Uniti, la scienza raccolse molti altri frutti non meno importanti: tra questi uno dei principali fu proprio l'esplorazione dell'Antartide, effettuata su scala internazionale. I soli Stati Uniti istituirono sette stazioni destinate a sondare lo spessore dei ghiacci e a portare alla luce, da chilometri di profondità, campioni di aria intrappolata nei ghiacci (che deve risalire a milioni di anni fa) e resti di batteri. Alcuni di questi, congelati a 30 metri di profondità e vecchi forse di cento anni, vennero riportati in vita e crebbero normalmente. Nel gennaio 1958 il gruppo sovietico stabilì una base nel polo dell'inaccessibilità - cioè nel punto dell'Antartide più lontano dall'oceano - e lì, a mille chilometri dal polo sud, registrò nuovi minimi di temperatura. Nell'agosto del 1960 - il cuore dell'inverno antartico - venne registrata

una temperatura di meno 88 gradi C, sufficiente a congelare l'anidride carbonica. Nel decennio successivo, nell'Antartide erano in funzione decine di stazioni permanenti.

L'impresa più spettacolare nell'Antartide fu quella compiuta da un'équipe di esploratori inglesi guidata da Vivian Ernest Fuchs ed Edmund Percival Hillary: per la prima volta nella storia, essa attraversò via terra il continente antartico, ovviamente servendosi di speciali veicoli e di tutte le sofisticate risorse che la scienza moderna metteva loro a disposizione. (Nel 1953, Hillary era anche stato il primo, insieme allo sherpa Tenzing Norgay, a scalare la vetta dell'Everest, la montagna più alta della terra.)

Il successo dell'IGY e il clima di cordialità generato da questa dimostrazione di cooperazione nel bel mezzo della guerra fredda portarono, nel 1959, a un accordo stipulato da dodici nazioni per bandire qualsiasi attività militare dall'Antartide (esplosioni nucleari e scarico di scorie radioattive compresi). In tal modo, l'Antartide resterà riservata alle attività scientifiche.

I GHIACCIAI.

Tutto il ghiaccio esistente sulla terra, che ammonta a circa 37 milioni di chilometri cubi, ricopre pressappoco il 10 per cento della sua superficie emersa. L'86 per cento circa del ghiaccio è concentrato nel ghiacciaio continentale antartico e il 10 per cento in quello groenlandese. Il restante 4 per cento forma i piccoli ghiacciai dell'Islanda, dell'Alaska, o quelli presenti nell'Himalaya o nelle Alpi e in pochi altri luoghi.

I ghiacciai delle Alpi vengono studiati da lungo tempo. Nel secondo decennio dell'Ottocento, due geologi svizzeri, Ignatz Venetz e Johann von Charpentier, notarono che alcune rocce caratteristiche delle Alpi centrali si trovavano sparse qua e là nelle pianure più a nord. Come vi erano arrivate? I geologi ipotizzarono che i ghiacciai montani avessero un tempo ricoperto una superficie molto più vasta, e avessero lasciati dietro a sé, ritirandosi, massi e cumuli di detriti.

Uno zoologo svizzero, Jean Louis Rodolphe Agassiz, esaminò più a fondo quest'ipotesi. Egli piantò delle file di paletti nei ghiacciai e si mise a osservare se, con il tempo, si spostavano. Nel 1840, Agassiz aveva dimostrato al di là di ogni dubbio che i ghiacciai scorrono come fiumi lentissimi, con una velocità di circa 70 metri all'anno. Nel frattempo aveva compiuto anche una serie di viaggi per tutta l'Europa, scoprendo tracce di ghiacciai in Francia e in Inghilterra. Anche in altre zone egli trovò massi estranei all'ambiente circostante, e scoprì sulle rocce dei segni di abrasione che potevano essere stati prodotti soltanto dallo sfregamento dei ciottoli intrappolati nella parte inferiore di qualche ghiacciaio in moto.

Agassiz nel 1846 si trasferì negli Stati Uniti, dove diventò professore a Harvard. Trovò tracce di glaciazione nel New England e nel Midwest. Nel 1850 era ormai evidente che, in qualche epoca del passato, gran parte dell'emisfero settentrionale doveva esser stata ricoperta da un enorme ghiacciaio continentale. I depositi lasciati dal ghiacciaio sono stati studiati a fondo dai tempi di Agassiz, e questi studi hanno mostrato che il ghiacciaio è avanzato e retrocesso parecchie volte nell'ultimo milione di anni, periodo che prende il nome di "Pleistocene".

Il termine "glaciazione del Pleistocene" oggi viene usato normalmente dai geologi in luogo di quello più comune di era glaciale. Si sono infatti avute altre ere glaciali prima del Pleistocene. Una risale a circa 250 milioni di anni fa, un'altra a 600 milioni di anni fa e forse ve ne fu ancora un'altra tra le due, circa 400 milioni di anni fa. Si sa poco di queste remotissime ere glaciali, perché l'enorme lasso di tempo trascorso ha cancellato questi tutte le tracce geologiche. In complesso, quindi, le ere glaciali sono poco frequenti, occupando meno dell'1 per cento di tutta la storia della terra.

Per quanto riguarda la glaciazione del Pleistocene, sembrerebbe che lo strato di ghiacci dell'Antartico, benché oggi sia di gran lunga il più vasto esistente, abbia avuto scarsa influenza sull'evoluzione dell'età glaciale più recente. Infatti i ghiacci dell'Antartide possono espandersi unicamente nel mare, dove si spezzano; i ghiacci galleggianti possono diventare più abbondanti e

quindi accentuare la loro azione di raffreddamento degli oceani in generale, ma le terre dell'emisfero meridionale sono troppo lontane dall'Antartide per venir esse stesse ricoperte da uno strato di ghiaccio (a parte la formazione di qualche ghiacciaio nelle estreme propaggini meridionali delle Ande).

Del tutto diverso è il caso dell'emisfero settentrionale, dove vaste estensioni di terra si addensano intorno al polo. Qui, invece, l'espandersi dello strato di ghiaccio assume una rilevanza cruciale; si parla infatti della glaciazione del Pleistocene riferendosi quasi esclusivamente all'emisfero settentrionale. Oltre all'unico ghiacciaio continentale artico esistente oggi (la Groenlandia), a quel tempo vi erano altre tre distese di ghiacci, ciascuna della superficie di circa 2 milioni e mezzo di chilometri quadrati: in Canada, in Scandinavia e in Siberia.

Forse per il fatto che la Groenlandia è stata il punto di partenza della glaciazione al nord, il vicino Canada subì una glaciazione molto più intensa della più distante Scandinavia, o dell'ancor più lontana Siberia. Lo strato di ghiaccio canadese, che si espanse a partire da nord-est, lasciò libera gran parte dell'Alaska e del versante del Pacifico, estendendosi invece verso sud, finché il fronte del ghiaccio ricoprì buona parte degli Stati Uniti settentrionali. Al massimo della sua estensione verso sud, il fronte dei ghiacci andava da Seattle, nello stato di Washington, a Bismarck, nel Nord Dakota; poi scendeva verso sud-est, seguendo dappresso il corso attuale del fiume Missouri, fino a Omaha e a Saint Louis; deviava quindi in direzione est raggiungendo Cincinnati, Filadelfia e New York. Sembra che la frontiera meridionale dei ghiacci attraversasse in tutta la sua lunghezza l'attuale Long Island.

Complessivamente, quando i ghiacci erano al massimo della loro estensione, ricoprivano più di 44 milioni di chilometri quadrati di terra nelle due regioni polari, ossia circa il 30 per cento dell'attuale superficie delle terre emerse. Si tratta del triplo della terraferma ricoperta oggi da ghiacci.

Un attento esame degli strati di sedimenti nel suolo delle aree in cui si estendevano allora i ghiacci mostra che essi sono avanzati e si sono ritirati quattro volte. Ciascuno dei quattro periodi glaciali è durato da 50 mila a 100 mila anni; tra l'uno e l'altro di essi vi furono tre "periodi interglaciali", miti o addirittura caldi, i quali furono anche lunghi.

La quarta glaciazione - la più recente - raggiunse il suo culmine circa 18 mila anni fa, quando la sua estensione raggiunse quello che oggi è il fiume Ohio. Seguì una lenta ritirata dei ghiacci. Per farsi un'idea di quanto essa fosse lenta, basti sapere che, in certi periodi, avveniva al ritmo di un'ottantina di metri soltanto all'anno, mentre in altri periodi si aveva addirittura una parziale e temporanea avanzata.

Circa 10 mila anni fa, quando nel Medio Oriente già avevano inizio le prime civiltà, i ghiacciai cominciarono a ritirarsi definitivamente. 8000 anni fa, i Grandi Laghi erano ormai allo scoperto; e circa 5000 anni fa (quando ormai in Medio Oriente era stata inventata la scrittura), i ghiacci si erano ritirati all'incirca nelle aree in cui si trovano oggi.

Questo andare e venire dei ghiacciai ha influenza non solo sul clima di tutta la terra, ma sulla stessa forma dei continenti. Per esempio, se l'attuale tendenza alla contrazione dei ghiacciai di Groenlandia e Antartide dovesse continuare fino alla fusione totale, il livello degli oceani salirebbe di circa 60 metri, sommergendo le zone costiere di tutti i continenti, comprese molte delle città più grandi del mondo: il livello delle acque raggiungerebbe il ventesimo piano dei grattacieli di Manhattan. Viceversa, Alaska, Canada, Siberia, Groenlandia e perfino l'Antartide diventerebbero più abitabili. Accadrebbe esattamente il contrario al culmine di un'era glaciale. Grandi quantità di acqua verrebbero congelate e formerebbero calotte di ghiaccio sopra la terraferma (quantità fino a tre o quattro volte quella odierna), così che il livello delle acque negli oceani scenderebbe anche di 135 metri rispetto a quello attuale. Di conseguenza finirebbero allo scoperto gli zoccoli continentali.

Gli zoccoli continentali sono porzioni di oceano, relativamente poco profonde, situate in prossimità dei continenti. Il fondale marino scende abbastanza gradualmente fino a una profondità

di circa 130 metri, dopo di che la discesa diventa molto più ripida, così che si raggiungono rapidamente profondità molto maggiori. Gli zoccoli continentali, dal punto di vista strutturale, fanno parte dei continenti a cui sono prossimi, e il loro margine costituisce il vero limite dei continenti. Attualmente, nei bacini oceanici il livello dell'acqua è così alto che i bordi dei continenti sono sommersi.

Né si creda che gli zoccoli continentali occupino una piccola superficie; essi sono molto più larghi in certe zone che in altre; ve ne è uno molto ampio, per esempio, lungo la costa orientale degli Stati Uniti, mentre molto più stretto è quello lungo la costa occidentale (che è al limite di una zolla tettonica).

In complesso, comunque, lo zoccolo continentale è largo in media circa 80 chilometri, e la sua superficie totale ammonta a 26 milioni di chilometri quadrati. In altre parole, una potenziale superficie continentale un po' più grande dell'Unione Sovietica è sommersa sotto le acque degli oceani.

È questa l'area che risulta esposta durante le epoche di massima glaciazione, e così accadde effettivamente negli ultimi grandi periodi glaciali. Dagli zoccoli continentali, a chilometri di distanza dalla terraferma e a molti metri di profondità, sono stati portati in superficie fossili di animali terrestri, per esempio denti di elefante. C'è di più: quando le parti più settentrionali dei continenti erano ricoperte dai ghiacci, le piogge erano più frequenti di oggi e bagnavano anche regioni situate più a sud, così che allora il deserto del Sahara era una prateria. L'inaridirsi del Sahara, man mano che le calotte di ghiaccio si ritiravano, è avvenuto non molto prima dell'inizio dei tempi storici.

Dunque l'abitabilità è un fenomeno pendolare: allorché il livello del mare si abbassa, grandi zone continentali diventano deserti di ghiaccio, mentre gli zoccoli continentali diventano invece abitabili, e altrettanto accade per gli attuali deserti. Al salire del livello delle acque vengono sommersi ampi bassipiani, mentre le regioni polari diventano abitabili e ora sono i deserti di ghiaccio a ritirarsi.

I periodi di glaciazione non sono stati, dunque, necessariamente periodi di catastrofica desolazione. Tutto il ghiaccio presente sulla terra nei periodi di massima estensione della glaciazione non costituisce che lo 0,35 per cento circa del totale delle acque degli oceani. Quindi l'oceano non subisce grandi effetti per l'oscillazione dei ghiacci. Certo, le aree poco profonde durante la glaciazione diminuiscono di molto, e si tratta di aree ricche di vita. D'altra parte, però, le acque dell'oceano ai tropici sono in tali periodi ovunque più fredde di 2-5 gradi rispetto a oggi, il che significa più ossigeno in soluzione e più vita.

Inoltre l'avanzare e il ritirarsi dei ghiacci è un fenomeno estremamente lento, e la vita animale è generalmente in grado di adattarsi, migrando gradualmente a nord e a sud. Anzi, i tempi lunghi consentono anche un adattamento evolutivo, così che durante le ere glaciali, per esempio, prosperarono i mammut coperti di lana. Infine, le oscillazioni non sono così estreme come si potrebbe credere, perché il ghiaccio non fonde mai del tutto. La calotta dell'Antartide esiste, relativamente immutata, da circa 20 milioni di anni, e limita le fluttuazioni del livello del mare e della temperatura.

Con ciò, non intendo dire che il futuro non dia adito a qualche preoccupazione: nulla lascia pensare che non debba sopravvenire un giorno una quinta glaciazione - con i relativi problemi. All'epoca dell'ultima glaciazione, i pochi esseri umani che popolavano la terra erano cacciatori, e potevano facilmente spostarsi verso sud o verso nord, seguendo le tracce degli animali di cui andavano a caccia.

Quando verrà la prossima glaciazione, gli esseri umani saranno sicuramente, come oggi, numerosissimi, e relativamente legati a determinati luoghi, come le città. È inoltre possibile che vari aspetti della tecnologia umana possano affrettare l'avanzata o il ritiro dei ghiacciai.

CAUSE DELLE GLACIAZIONI.

La questione principale a proposito delle glaciazioni riguarda la loro causa. Cosa fa avanzare o retrocedere i ghiacci, e perché le glaciazioni sono state relativamente brevi, come per esempio quella presente, che ha occupato solo un milione degli ultimi cento milioni di anni?

Basta un piccolo cambiamento nella temperatura per dare inizio o per porre termine a un'era glaciale - per esempio un lieve abbassamento di temperatura che faccia accumulare un po' più di neve durante l'inverno di quella che fonde durante l'estate, o un piccolo aumento di temperatura che faccia sciogliere durante l'estate un po' più neve di quella caduta durante l'inverno. Si stima che una diminuzione nella temperatura media annua terrestre di soli 3,5 gradi C sia sufficiente a far accrescere i ghiacciai, mentre un aumento di pari entità fonderebbe i ghiacci dell'Antartide e della Groenlandia, mettendone a nudo le rocce, nel giro di alcuni secoli.

Una piccola caduta di temperatura sufficiente a far estendere leggermente lo strato dei ghiacci per qualche anno basta ad alimentare il processo. Il ghiaccio riflette la luce più di quanto non facciano il suolo o la roccia nuda; infatti il ghiaccio riflette il 90 per cento della luce incidente, mentre il suolo ne riflette meno del 10 per cento. Un leggero aumento della coltre di ghiaccio produrrebbe un incremento della riflessione di luce solare e quindi una diminuzione dell'assorbimento, così che la temperatura media della terra scenderebbe ancora un poco, accelerando ulteriormente l'estensione dei ghiacci.

Analogamente, se la temperatura della terra aumentasse anche di poco - tanto da produrre un piccolo arretramento dei ghiacci - sarebbe riflessa meno luce solare e ne sarebbe assorbita di più, e la ritirata dei ghiacci verrebbe accelerata.

Qual è, dunque, il processo che innesca il fenomeno, in un senso o nell'altro?

Una possibilità sta nel fatto che l'orbita terrestre non è del tutto costante, non si ripete cioè esattamente identica da un anno all'altro. Per esempio, il momento del perielio non è fisso.

Attualmente il perielio, il momento cioè in cui il sole è più vicino alla terra, si verifica poco dopo il solstizio d'inverno; ma la sua posizione muta in continuazione, spostandosi sull'orbita terrestre in modo da compiere un giro completo in 21310 anni. Inoltre anche la direzione dell'asse terrestre muta, descrivendo un cerchio nel cielo (la precessione degli equinozi) in 25780 anni. E ancora, l'asse ha un lento moto di oscillazione, che alternativamente ne aumenta e ne diminuisce leggermente l'inclinazione.

Tutti questi cambiamenti hanno un effetto sulla temperatura media della terra - non un grande effetto, ma tale da poter talora innescare un'avanzata o una ritirata dei ghiacciai.

Nel 1920 un fisico jugoslavo, Milutin Milankovic, ipotizzò l'esistenza di un ciclo, della durata di 40 mila anni, con una «grande primavera», una «grande estate», un «grande autunno» e un «grande inverno», ciascuno della durata di 10 mila anni. Secondo questa teoria, la terra sarebbe particolarmente suscettibile alle glaciazioni durante il «grande inverno», e quando concorressero altre condizioni favorevoli una glaciazione si verificherebbe effettivamente. Una volta verificatasi la glaciazione, la terra avrebbe maggiori probabilità di uscirne durante una «grande estate», sempre se altre condizioni favorevoli fossero in atto.

La proposta di Milankovic non incontrò molto favore ai suoi tempi. Nel 1976, però, il problema fu affrontato negli Stati Uniti da J. D. Hays e John Imbrie e in Gran Bretagna da N. J. Shackleton; essi lavorarono su lunghe «carote» di sedimenti dragate in due diversi punti dell'Oceano Indiano - relativamente poco profondi e abbastanza lontani dalla terraferma per garantire che non vi arrivasse materiale contaminante dalle zone costiere più vicine o da fondali marini ancora meno profondi.

Queste carote erano costituite di materiale che si era andato depositando in continuazione durante un periodo di 450 mila anni. Man mano che si consideravano strati più profondi delle carote, si tornava indietro nel tempo. Era possibile studiare gli scheletri di minuscoli animali unicellulari appartenenti a specie diverse, che prosperano in habitat con temperature differenti. Da tale studio si poteva stabilire la temperatura alla quale si era formato ciascuno strato.

Inoltre gli atomi di ossigeno si presentano in due differenti varietà, il cui rapporto quantitativo varia in funzione della temperatura; misurando tale rapporto in punti diversi della carota, era quindi possibile determinare la temperatura dell'oceano in tempi diversi. I due metodi per la ricostruzione delle temperature diedero risultati concordi, che sembravano accreditare qualcosa di molto simile al ciclo di Milankovic. Può quindi darsi che la terra abbia, a intervalli molto lunghi, un grande inverno con una glaciazione, proprio come ha ogni anno un normale inverno, in cui si ricopre di nevi.

Ma allora, perché il ciclo di Milankovic avrebbe operato durante il Pleistocene, e non durante i duecento milioni di anni antecedenti, nei quali non vi fu alcuna glaciazione?

Nel 1953, Maurice Ewing e William L. Donn pensarono che la soluzione di tale quesito poteva essere rintracciata nella peculiare geografia dell'emisfero settentrionale. La regione artica è quasi completamente occupata dall'oceano, però si tratta di un oceano chiuso dalla terraferma e circondato da tutte le parti da enormi masse continentali.

Immaginiamo che l'Oceano Artico sia appena un poco più caldo di quanto è oggi, ricoperto da un esiguo strato di ghiaccio o addirittura scoperto, che si presenti cioè come una distesa liquida ininterrotta.

In tal caso esso sarebbe una fonte di vapor acqueo, che si raffredderebbe nelle zone superiori dell'atmosfera, per poi cadere sotto forma di neve: la neve finita sulle acque dell'oceano si scioglierebbe, ma quella finita sulle circostanti masse continentali si accumulerebbe, innescando la glaciazione: la temperatura diminuirebbe e l'Oceano Artico congelerebbe.

Il ghiaccio non produce una quantità di vapor acqueo pari a quella prodotta dall'acqua liquida alla stessa temperatura. Una volta congelatosi, l'Oceano Artico immetterebbe nell'aria meno vapor acqueo e cadrebbe meno neve. I ghiacciai comincerebbero a ritirarsi, e, una volta innescata la deglaciazione, il processo verrebbe accelerato.

Potrebbe quindi darsi che il ciclo di Milankovic dia adito a periodi di glaciazione solo nel caso che vi sia un oceano racchiuso dalle terre a uno o a entrambi i poli. Possono trascorrere anche centinaia di milioni di anni in cui, non verificandosi tali condizioni, non ci sono glaciazioni; ma, a lungo andare, sarebbe la deriva delle zolle tettoniche a creare una situazione favorevole, dando inizio a un periodo di un milione di anni, o anche più, in cui i ghiacciai seguiterebbero ad avanzare e a retrocedere regolarmente. Questa interessante ipotesi non è stata ancora accettata completamente.

Naturalmente vi sono anche cambiamenti meno regolari della temperatura terrestre e fattori abbastanza imprevedibili che determinano tendenze al raffreddamento o al riscaldamento. Il chimico americano Jacob Bigeleisen, in collaborazione con H. C. Urey, misurò il rapporto tra le due varietà dell'atomo di ossigeno negli antichi fossili degli animali marini, allo scopo di determinare la temperatura dell'acqua in cui essi avevano vissuto. Nel 1950, Urey e il suo gruppo avevano ormai sviluppato una tecnica così raffinata che, analizzando gli strati di un fossile vecchio di milioni di anni (una forma estinta di calamaro), erano riusciti a stabilire che si trattava di una creatura nata in estate, vissuta quattro anni e morta in primavera.

Questo «termometro» ha stabilito che cento milioni di anni orsono la temperatura media globale dell'oceano si aggirava sui 21 gradi C. Poi essa scese lentamente fino ai 16 gradi C di dieci milioni di anni dopo, per risalire a 21 gradi C in altri dieci milioni di anni. Da allora la temperatura è costantemente diminuita. Quale che sia il fattore che ha innescato questa diminuzione della temperatura, esso potrebbe benissimo aver contribuito all'estinzione dei dinosauri (che probabilmente erano assuefatti a climi miti e costanti), favorendo invece mammiferi e uccelli, che, avendo sangue caldo, sono in grado di mantenere costante la temperatura corporea interna.

Cesare Emiliani, usando la tecnica di Urey, studiò i gusci dei foraminiferi rinvenuti nelle «carote» estratte dal fondale oceanico e trovò che la temperatura generale dell'oceano si aggirava sui 10 gradi C e sui 6 gradi C rispettivamente trenta e venti milioni di anni fa, mentre oggi è di 1,7 gradi C.

Che cosa provoca i cambiamenti di lungo periodo della temperatura? Una possibile spiegazione è il cosiddetto "effetto serra" dovuto all'anidride carbonica, la quale assorbe piuttosto attivamente la radiazione infrarossa; pertanto, quando l'atmosfera ne è relativamente ricca, l'anidride carbonica tende a impedire, durante la notte, la perdita del calore assorbito dalla terra durante il giorno, con conseguente aumento di temperatura. Inversamente, quando il contenuto di anidride carbonica nell'aria diminuisce, la terra si raffredda progressivamente.

Se l'attuale concentrazione di anidride carbonica nell'aria raddoppiasse (passando dallo 0,03 allo 0,06 per cento), questa piccola differenza basterebbe a far salire di quasi 3 gradi la temperatura generale della terra, provocando un rapido e totale scioglimento dei ghiacciai continentali. Se l'anidride carbonica si riducesse alla metà della percentuale odierna, la temperatura a sua volta diminuirebbe quanto basta per far discendere nuovamente i ghiacciai fino alla zona di New York.

I vulcani immettono nell'aria grandi quantità di anidride carbonica; le rocce esposte agli agenti atmosferici assorbono invece anidride carbonica (formando calcare). Di qui la possibilità di due processi capaci di modificare il clima a lungo termine: un periodo di attività vulcanica superiore al normale potrebbe immettere nell'aria un'ingente quantità di anidride carbonica innescando un riscaldamento della terra; viceversa, un'epoca di formazione di montagne, in cui grandi superfici rocciose fossero esposte per la prima volta al contatto con l'aria, potrebbe provocare un calo della concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera. È proprio un processo di quest'ultimo tipo che potrebbe essersi verificato sul finire del "Mesozoico", l'era dei rettili, circa 80 milioni di anni fa, quando ebbe inizio il lungo periodo di diminuzione della temperatura terrestre.

Quale che sia stata la causa delle ere glaciali, oggi sembra che possa essere l'umanità stessa a modificare il clima futuro del pianeta. Il fisico americano Gilbert N. Plass ha sostenuto che forse stiamo assistendo all'ultima era glaciale, perché la civiltà, con il suo massiccio uso di combustibili, sta saturando l'atmosfera di anidride carbonica. Cento milioni di scarichi riversano incessantemente nell'aria anidride carbonica, per un totale che raggiunge i sei miliardi di tonnellate all'anno - duecento volte la quantità immessa dai vulcani. Plass ha fatto osservare che il contenuto di anidride carbonica dell'atmosfera è cresciuto, dal 1900, del 10 per cento circa, e che entro il 2000 esso potrebbe avere un analogo incremento.

Egli ha calcolato che questo rafforzamento dello scudo che impedisce la fuga del calore dalla terra, producendo l'effetto serra, potrebbe innalzare la temperatura media di circa 1,1 gradi C al secolo. Durante la prima metà del ventesimo secolo la temperatura media è effettivamente salita con questo ritmo, secondo i dati di cui disponiamo (soprattutto nel Nordamerica e in Europa). Se la temperatura seguitasse a crescere con questo ritmo, i ghiacciai continentali potrebbero scomparire in un paio di secoli.

Le indagini compiute durante l'Anno Geofisico Internazionale sembravano confermare che i ghiacciai effettivamente retrocedono quasi ovunque. È stato riferito nel 1959 che un grande ghiacciaio nell'Himalaya si era ritirato di più di 200 metri rispetto al 1935, mentre altri si erano ritirati di 300 metri o addirittura di 600 metri. I pesci acclimatati alle acque molto fredde stanno migrando verso nord, e anche gli alberi dei climi caldi stanno espandendosi nella stessa direzione. Il livello del mare cresce leggermente ogni anno, come ci si deve attendere se i ghiacciai si stanno sciogliendo.

Il livello del mare è già tanto alto che, quando una violenta tempesta si verifica durante l'alta marea, l'oceano quasi minaccia di inondare la metropolitana di New York.

Ciononostante sembra che si sia verificato un leggero abbassamento della temperatura dall'inizio degli anni quaranta in poi, tanto da controbilanciare metà dell'aumento verificatosi tra il 1880 e il 1940.

Questo fenomeno è forse dovuto al fatto che, dal 1940, la polvere e lo smog presenti nell'aria sono aumentati continuamente: queste particelle in sospensione bloccano parte della luce solare e quindi, in un certo senso, schermano la terra. Sembra dunque che vi siano due tipi diversi

di inquinamento dell'atmosfera prodotti dall'uomo, i cui effetti si eliminano a vicenda, almeno sotto questo aspetto e almeno temporaneamente.

Capitolo 5.
L'ATMOSFERA.

GLI INVOLUCRI DI ARIA.

Aristotele supponeva che il mondo fosse fatto di quattro involucri sferici, ciascuno costituito di uno dei quattro elementi della materia: terra (la sfera solida), acqua (l'oceano), aria (l'atmosfera) e fuoco (una sfera esterna invisibile, che diventava occasionalmente visibile nel bagliore dei lampi). Egli sosteneva inoltre che all'esterno di queste sfere l'universo fosse composto di un quinto elemento perfetto, non terrestre, che chiamò "etere" (detto poi, in latino, "quinta essentia", letteralmente «quinto elemento»).

In questo schema non c'era posto per il vuoto: dove finiva la terra, cominciava l'acqua; dove finivano entrambe, cominciava l'aria; dove finiva l'aria, cominciava il fuoco; e dove finiva il fuoco, cominciava l'etere, che continuava fino al confine dell'universo. «La natura,» dicevano gli antichi, «ha orrore del vuoto.»

MISURE DELL'ATMOSFERA.

La pompa aspirante, un'invenzione utilizzata fin dall'antichità per estrarre l'acqua dai pozzi, sembrava illustrare in modo mirabile questo orrore del vuoto. Uno stantuffo scorre entro un cilindro aderendo ermeticamente alle sue pareti; quando si spinge verso il basso la leva della pompa, lo stantuffo viene tirato verso l'alto, e lascia uno spazio vuoto nella parte inferiore del cilindro. Ma siccome la natura aborre il vuoto, l'acqua che circonda la base del cilindro fa aprire una valvola a senso unico posta sul fondo del cilindro stesso, e irrompe nello spazio vuoto. Ripetendo più volte l'operazione, l'acqua sale sempre di più nel cilindro, fino a traboccare dal becco della pompa.

Secondo la teoria aristotelica, questo sistema avrebbe dovuto consentire di innalzare l'acqua fino a qualsiasi altezza. Ma i minatori, che dovevano pompare l'acqua verso l'alto sgombrando il fondo delle miniere, scoprirono che non era possibile sollevare l'acqua per più di dieci metri sopra il suo livello iniziale, per quanto si pompasse con forza e a lungo.

Galileo si interessò molto a questo problema verso la fine della sua lunga vita di ricercatore. Non riuscì a raggiungere alcuna conclusione, salvo quella che, a quanto pare, la natura aborre il vuoto solo fino a un certo limite; egli si chiese se questo limite sarebbe stato inferiore usando un liquido più denso dell'acqua, ma morì prima di aver potuto effettuare questo esperimento.

I suoi discepoli Evangelista Torricelli e Vincenzo Viviani effettuarono l'esperimento nel 1644. Scelsero il mercurio, che ha una densità 13,5 volte maggiore di quella dell'acqua, riempirono con tale liquido un tubo di vetro lungo un metro, tapparono l'estremità aperta del tubo, lo capovolsero in una vaschetta piena di mercurio e tolsero il tappo. Il mercurio cominciò a defluire dal tubo nella vaschetta, ma, quando il suo livello raggiunse i 76 centimetri sopra il livello del mercurio nella vaschetta, esso smise di uscire dal tubo e si arrestò.

Era stato così realizzato il primo "barometro"; i moderni barometri a mercurio non sono sostanzialmente diversi. Non ci volle molto perché si comprendesse che l'altezza della colonna di mercurio non era sempre identica. Lo scienziato inglese Robert Hooke osservò, dopo il 1660, che l'altezza della colonna di mercurio diminuiva prima dei temporali, aprendo così la via alla previsione scientifica del tempo, cioè alla "meteorologia".

Ma che cosa impediva al mercurio di scendere? Viviani ipotizzò che fosse il peso dell'atmosfera, che premeva sul liquido nella vaschetta. Era un'idea rivoluzionaria, perché secondo la concezione aristotelica l'aria non aveva peso, essendo attratta solo dalla propria sfera, al di sopra della terra. Ora, invece, risultava evidente che una colonna di acqua dell'altezza di dieci metri, o una colonna di mercurio di 76 centimetri, misuravano il peso dell'atmosfera - cioè il peso di una colonna di aria di pari sezione, che dal livello del mare si elevasse fin dove giunge l'atmosfera.

L'esperimento dimostrava anche che non necessariamente la natura aborre dal vuoto in tutte le circostanze. Lo spazio che restava nell'estremo chiuso del tubo dopo la caduta del mercurio era vuoto, non contenendo altro che una quantità piccolissima di vapore di mercurio; questo "vuoto torricelliano" fu il primo vuoto prodotto artificialmente.

Il vuoto fu messo quasi immediatamente al servizio della scienza. Nel 1650 lo studioso tedesco Athanasius Kircher dimostrò che il suono non si propaga nel vuoto, confermando, una volta tanto, un'affermazione di Aristotele. Nel decennio successivo Robert Boyle mostrò che oggetti molto leggeri cadevano nel vuoto con la stessa velocità degli oggetti pesanti, confermando in tal modo le teorie di Galileo sul moto (contro quelle di Aristotele).

Se l'aria aveva un peso finito, doveva avere anche un'altezza finita.

Risultò che il peso dell'atmosfera era di 1,033 chilogrammi per centimetro quadrato; in base a questo dato, si poté calcolare che l'atmosfera doveva essere alta solo otto chilometri circa - sempre che la sua densità restasse invariata per tutta la sua altezza. Nel 1662, però, Boyle dimostrò che questo era impossibile, perché la densità dell'aria cresceva con la pressione. Boyle prese un tubo a forma di J [i lunga] e, tenendolo verticale, versò del mercurio nell'imboccatura, all'estremità del ramo più lungo; il mercurio intrappolò un po' d'aria nell'estremo chiuso del ramo corto del tubo; versando altro mercurio, la sacca di aria si restringeva, e al tempo stesso la sua pressione aumentava, come Boyle dedusse dal fatto che la contrazione diminuiva via via che aumentava il peso del mercurio. Effettuando misurazioni accurate, Boyle dimostrò che, riducendo a metà il volume del gas, la sua pressione raddoppiava; in altre parole, il volume variava in modo inversamente proporzionale alla pressione. Questa storica scoperta, nota come "legge di Boyle", costituì il primo passo nella lunga serie di scoperte sulla materia, che finirono per portare alla teoria atomica.

Se l'aria diminuisce di volume per effetto della pressione, deve essere più densa a livello del mare, rarefacendosi gradualmente al diminuire del peso dell'aria sovrastante, via via che ci si innalza verso gli strati superiori dell'atmosfera. Questo fatto fu dimostrato per la prima volta nel 1648 dal matematico francese Blaise Pascal, che fece salire su una montagna alta circa 1500 metri il cognato Florin Perier, munito di un barometro, perché osservasse di quanto calava il livello del mercurio al crescere dell'altitudine.

Calcoli teorici mostrarono che, nell'ipotesi di una temperatura costante alle varie quote, la pressione dell'aria diminuirebbe di dieci volte ogni 20 chilometri di altitudine in più. In altri termini, a 20 chilometri di quota la colonna di mercurio controbilanciata dall'aria passerebbe da 76 a 7,6 centimetri; a 40 chilometri sarebbe di 0,76 centimetri, a 60 chilometri di 0,076 centimetri, e così via. A un'altitudine di 180 chilometri, la pressione dell'aria sarebbe pari a soli 0,000000076 centimetri di mercurio. Può sembrare assai poco, ma il peso globale dell'aria al di sopra dei 180 chilometri di altitudine sarebbe ancora di 5,5 milioni di tonnellate.

In realtà tutte queste cifre non sono che approssimazioni, perché la temperatura dell'aria varia con l'altitudine. Tuttavia questi dati forniscono un'idea generale della situazione, mostrandoci che l'atmosfera non ha un limite netto, ma si rarefà gradualmente dissolvendosi nel vuoto dello spazio. Scie di meteoriti sono state osservate perfino alla quota di 160 chilometri, dove l'aria ha una pressione che è solo un milionesimo di quella che ha alla superficie della terra e una densità che è solo un miliardesimo. Eppure è quanto basta per portare all'incandescenza questi minuscoli frammenti di materia, riscaldati dalla resistenza dell'aria. Quanto poi alle aurore boreali, che sono

formate da filamenti di gas resi luminosi dal bombardamento di particelle provenienti dallo spazio esterno, esse vengono localizzate fra gli 800 e i 1000 chilometri sopra il livello del mare.

VIAGGI NELL'ARIA.

Fin dai tempi più antichi, sembra che gli uomini abbiano sempre desiderato ossessivamente di viaggiare nell'aria. Il vento può far volare oggetti leggeri - come le foglie, le piume, i semi. Più suggestivo è il volo planato di animali come gli scoiattoli volanti, i falangisti volanti e perfino i pesci volanti; ma naturalmente di gran lunga più appariscenti sono gli animali capaci di volare veramente: insetti, pipistrelli, uccelli.

Dell'aspirazione degli esseri umani a seguire tali esempi è rimasta traccia nei miti e nelle leggende. Gli dei e i demoni sono normalmente in grado di viaggiare via aria (angeli e fate sono sempre rappresentati con le ali); vi è poi la leggenda di Icaro, da cui ha preso il nome un asteroide (vedi capitolo terzo), nonché quella del cavallo volante, Pegaso, per non parlare dei tappeti volanti delle leggende orientali.

Il primo congegno artificiale in grado, se non altro, di librarsi ad altezze notevoli per un tempo considerevole fu l'aquilone, un foglio di carta, o di un materiale analogo, teso su una leggera intelaiatura di legno, munito di una coda per garantire la stabilità e di una lunga corda con cui tenerlo. Si dice che a inventarlo sia stato il filosofo greco Archita, nel quarto secolo avanti Cristo.

Gli aquiloni sono stati usati per migliaia di anni, soprattutto per divertimento, anche se non mancano possibilità di utilizzazione pratica: è possibile appendervi segnali luminosi in modo che siano visibili da una vasta area, oppure si possono sfruttare per far passare da una parte all'altra di un fiume o di un burrone una leggera corda, che poi servirà a tendere cavi più grossi, consentendo la costruzione di un ponte.

Il primo tentativo di usare un aquilone (o cervo volante) per fini scientifici fu fatto nel 1749, quando un astronomo scozzese, Alexander Wilson, vi attaccò dei termometri, con la speranza di misurare la temperatura in quota. Molto più importante fu l'aquilone fatto innalzare da Benjamin Franklin nel 1752, su cui tornerò nel capitolo nono.

I cervi volanti (o analoghi marchingegni capaci di librarsi nell'aria) non diventarono abbastanza grandi e robusti da poter trasportare persone per altri centocinquanta anni, ma il problema fu risolto altrimenti durante la vita di Franklin.

Nel 1782 due fratelli francesi, Joseph Michael e Jacques Etienne Montgolfier, accesero un fuoco sotto a un grande involucro fornito di un'apertura nella parte inferiore, in modo da riempire l'involucro stesso di aria calda, con l'effetto di farlo lentamente sollevare. I fratelli Montgolfier avevano così lanciato con successo il primo pallone. Nel giro di pochi mesi, i palloni cominciarono a essere riempiti di idrogeno, un gas con densità pari a un quattordicesimo della densità dell'aria, così che ogni chilogrammo d'idrogeno era in grado di sollevare un carico utile di 13 chilogrammi. Sulle navicelle dei palloni vennero fatti salire animali, e poco dopo anche uomini. Prima che fosse trascorso un anno dal lancio del primo pallone, un americano, John Jeffries, compì un volo su Londra con a bordo un barometro e altri strumenti, tra cui un dispositivo per raccogliere l'aria a varie altezze. Nel 1804 lo scienziato francese Joseph Louis Gay-Lussac salì fino a un'altezza di oltre 7000 metri, riportando poi a terra campioni di aria rarefatta. Queste imprese avventurose divennero un po' più sicure quando l'aeronauta francese Jean Pierre Blanchard, nel 1785, ancora all'alba dell'"età del pallone", inventò il paracadute.

Si era comunque quasi raggiunto il limite a cui potevano spingersi degli esseri umani in una navicella aperta: nel 1875 tre uomini salirono a quasi 10 mila metri, ma solo uno di loro, Gaston Tissandier, sopravvisse alla scarsezza di ossigeno, e poté descrivere i sintomi della mancanza di aria: era nata così la "medicina aeronautica". Palloni senza uomini a bordo, ma muniti di strumenti, vennero ideati e lanciati nel 1892; in questo caso era possibile infatti mandarli ancora più in alto,

ottenendone poi informazioni sulla temperatura e la pressione di regioni dell'atmosfera fino ad allora inesplorate.

Nei primi chilometri di ascesa, la temperatura diminuiva, come previsto. A circa 11 chilometri era di meno 55 gradi C. Ma ecco una sorpresa: al di sopra di questo livello, la temperatura non diminuiva più, anzi aumentava leggermente.

Il meteorologo francese Léon Philippe Teisserenc de Bort, nel 1902, avanzò l'ipotesi che l'atmosfera potesse consistere di due strati: uno inferiore turbolento, sede di nuvole, venti, tempeste, e di tutti gli altri ben noti fenomeni atmosferici (nel 1908, egli denominò questo strato "troposfera", da una parola greca che significa: sfera dei cambiamenti); e uno strato superiore più tranquillo, formato da sottostrati dei gas più leggeri, elio e idrogeno (che denominò appunto "stratosfera"). Teisserenc de Bort chiamò il livello in cui cessava la diminuzione della temperatura "tropopausa" (fine dei cambiamenti); essa segna il confine tra troposfera e stratosfera. La tropopausa, com'è risultato in seguito, varia da un'altitudine di circa 16 chilometri sul livello del mare, all'equatore, a soli 8 chilometri al di sopra dei poli.

Durante la seconda guerra mondiale alcuni piloti di bombardieri americani che volavano ad alta quota scoprirono, subito al di sotto della tropopausa, un fenomeno eclatante: la "corrente a getto", cioè un vento costante, fortissimo, diretto da ovest a est, con velocità fino a 800 chilometri all'ora. In realtà vi sono due correnti a getto, una nell'emisfero settentrionale, alla latitudine degli Stati Uniti, del Mediterraneo e della Cina settentrionale, l'altra nell'emisfero meridionale, alla latitudine della Nuova Zelanda e dell'Argentina. Le correnti hanno un andamento serpeggiante, e danno spesso origine a vortici, molto a nord o a sud del loro corso abituale. Oggi gli aerei approfittano di queste rapide correnti d'aria. Ma molto più importante è la scoperta che le correnti a getto hanno una grandissima influenza sul movimento delle masse d'aria a livelli inferiori, una conoscenza questa che contribuì immediatamente a migliorare le previsioni meteorologiche.

Dato che gli esseri umani non possono sopravvivere nell'atmosfera fredda e rarefatta delle grandi altezze, si rese necessario realizzare cabine a tenuta ermetica, entro le quali si potessero mantenere le pressioni e le temperature che ha l'aria alla superficie della terra.

Così, nel 1931, i fratelli Piccard (Auguste e Jean Félix), il primo dei quali doveva più tardi inventare il batiscafo, salirono fino a 18 mila metri con un pallone a cui era attaccata una navicella chiusa ermeticamente. Poi nuovi palloni di materiale plastico, più leggero e meno poroso della seta, consentirono di salire più in alto e di rimanervi più a lungo. Nel 1938 un pallone denominato "Explorer Secondo" si spinse fino a 21 chilometri di altezza e, durante gli anni ottanta, palloni con uomini a bordo hanno raggiunto i 38 chilometri, mentre palloni senza equipaggio hanno superato addirittura i 50 chilometri.

Questi voli a quote superiori hanno mostrato che la zona a temperatura quasi costante non si estende indefinitamente verso l'alto. La stratosfera finisce a un'altezza di circa 32 chilometri, e più in alto la temperatura comincia ad aumentare!

In questa "atmosfera superiore" (al di sopra della stratosfera), che contiene solo il 2 per cento della massa di aria totale della terra, fu possibile penetrare negli anni quaranta, quando ulteriori progressi tecnologici misero a disposizione un tipo di veicolo completamente nuovo, il razzo (vedi capitolo terzo).

Il modo più diretto di leggere le misure degli strumenti che hanno registrato le condizioni dell'aria a grandi altitudini, consiste nel far tornare tali strumenti a terra. È facile riportare a terra gli strumenti portati in alto da aquiloni, mentre i palloni sotto questo aspetto offrono maggiori difficoltà e i razzi, poi, possono anche non ritornare affatto a terra. Naturalmente, è possibile fare in modo che il razzo espella un contenitore con gli strumenti, che ritorneranno a terra da soli, ma anche questo metodo non è molto affidabile. I soli razzi, in pratica, avrebbero contribuito assai poco all'esplorazione dell'atmosfera, se non fosse stato per un'invenzione concomitante - la trasmissione delle misure a distanza ("telemisura"). Essa fu applicata per la prima volta a un pallone per la ricerca sull'atmosfera nel 1925, da parte dello scienziato russo P. A. Molchanoff.

Sostanzialmente, la tecnica della telemisura si basa sulla traduzione delle condizioni che si vogliono misurare (per esempio, la temperatura) in impulsi elettrici, che sono trasmessi a terra via radio. Le osservazioni prendono la forma di cambiamenti di intensità degli impulsi o di intervallo tra un impulso e l'altro. Per esempio, un cambiamento di temperatura fa variare la resistenza elettrica di un conduttore, cambiando in tal modo la natura dell'impulso; una variazione della pressione atmosferica, analogamente, si traduce in un dato impulso per il fatto che l'aria raffredda il conduttore, e l'entità di tale raffreddamento dipende dalla pressione; la radiazione suscita impulsi in un rivelatore, e così via. Oggigiorno la telemisura è diventata talmente sofisticata che ai razzi sembra mancare quasi soltanto la parola: i loro complessi messaggi debbono essere interpretati da computer veloci.

I razzi e la telemisura hanno dunque mostrato che al di sopra della stratosfera la temperatura sale fino a un massimo di circa meno 10 gradi C all'altezza di 48 chilometri e poi scende nuovamente fino a un minimo di meno 90 gradi C all'altezza di 80 chilometri. Questa regione in cui la temperatura prima sale e poi scende viene chiamata "mesosfera", termine coniato nel 1950 dal geofisico inglese Sydney Chapman.

La poca aria che si trova al di là della mesosfera non costituisce più di qualche millesimo dell'1 per cento della massa totale dell'atmosfera. Ma la temperatura di questi atomi dispersi aumenta costantemente, fino a un valore che si stima raggiunga i 1000 gradi C a 480 chilometri di altezza, e probabilmente raggiunge valori ancora più elevati salendo ulteriormente; pertanto questo strato viene chiamato "termosfera" («sfera del calore») - il che riecheggia stranamente la sfera del fuoco di Aristotele. Naturalmente, qui la temperatura non va associata al calore nel senso abituale: si tratta solo di una misura della velocità delle particelle.

Al di sopra dei 480 chilometri incomincia l'"esosfera" (termine usato per la prima volta da Lyman Spitzer nel 1949), che può estendersi fino a 1600 chilometri di altezza, per poi sfumare gradualmente nello spazio interplanetario.

Se avremo una conoscenza più approfondita dell'atmosfera potremo, in futuro, intervenire sul clima anziché limitarci a farne argomento di conversazione. Già sono stati compiuti alcuni passi in tal senso.

All'inizio degli anni quaranta, i chimici americani Vincent Joseph Schaefer e Irving Langmuir avevano osservato che temperature molto basse potevano produrre i nuclei di condensazione necessari per la formazione delle gocce di pioggia. Nel 1946 un aereo lasciò cadere dell'anidride carbonica in polvere su un banco di nubi allo scopo di formare i nuclei di condensazione e quindi le gocce di pioggia ("semina delle nubi"). Mezz'ora dopo pioveva. Bernard Vonnegut migliorò in seguito la tecnica, scoprendo che funzionava ancora meglio lo ioduro di argento in polvere, lanciato dal suolo verso l'alto; oggi, grazie a nuove tecniche, si ricorre alla pioggia artificiale per por fine - o tentare di farlo - alla siccità. Occorre comunque sempre che vi siano delle nuvole, per poter applicare queste tecniche. Sempre con questi metodi, nel 1961 gli astronomi sovietici riuscirono a provocare in una zona del cielo una parziale schiarita per poter osservare un'eclissi.

Fra gli altri interventi di "modificazione del tempo atmosferico" vanno ricordati i tentativi di impedire lo sviluppo degli uragani o almeno di moderarne la violenza, la semina delle nuvole per scongiurare le grandinate che mettono in pericolo i raccolti, i tentativi di dissipare la nebbia, e così via. In tutti questi casi si sono avuti risultati promettenti ma non veri e propri successi.

Inoltre, qualsiasi tentativo di modificare deliberatamente il tempo è destinato ad arrecare vantaggi a un settore a spese di un altro (un contadino potrà desiderare che piova, mentre il gestore di un parco di divertimenti sarà di avviso contrario), così che le cause legali sono un ovvio effetto collaterale dei programmi di modificazione del clima.

Non è dunque facile dire cosa ci riserva il futuro in questo campo.

I razzi non hanno come unico scopo l'esplorazione (anche se questo è stato il solo uso che abbiamo citato nel capitolo terzo). Essi possono essere utilizzati al servizio quotidiano dell'umanità,

come già è avvenuto. Anzi, anche alcune forme di esplorazione possono dare dei risultati pratici immediati. Se si mette in orbita, mediante un razzo, un satellite, esso può puntare i suoi strumenti, invece che verso lo spazio esterno, anche in direzione della terra. In tal modo i satelliti hanno consentito di avere per la prima volta una visione globale del nostro pianeta (o almeno di buona parte di esso in ogni momento), e di studiare la circolazione dell'aria nel suo complesso.

Il primo aprile del 1960 gli Stati Uniti lanciarono il primo satellite meteorologico, il "Tiros Primo" ("Tiros" sta per "Television Infrared Observation Satellite", cioè satellite per l'osservazione televisiva all'infrarosso). Poi, nel novembre, venne lanciato "Tiros Secondo", che in dieci settimane inviò a terra più di 20 mila immagini di vasti tratti della superficie terrestre e della sua coltre di nubi; notevoli fra queste le immagini di un ciclone nella Nuova Zelanda e di un ammasso di nubi nell'Oklahoma da cui, presumibilmente, stavano nascendo dei tornado. "Tiros Terzo", lanciato nel luglio del 1961, fotografò diciotto tempeste tropicali, e, nel settembre, mostrò l'uragano Ester in formazione nei Caraibi due giorni prima che esso venisse individuato con i metodi tradizionali. Il più sensibile satellite, "Nimbus Primo", lanciato il 28 agosto 1964, riuscì addirittura a inviare a terra fotografie delle nubi prese di notte. In seguito centinaia di stazioni automatiche per la trasmissione di immagini entrarono in funzione in molte nazioni, tanto che oggi è divenuto inconcepibile fare una previsione del tempo senza i dati forniti dai satelliti. Qualsiasi giornale, oggi, può pubblicare quotidianamente una fotografia della distribuzione dei banchi di nubi sugli Stati Uniti o altrove, e le previsioni meteorologiche, anche se, di sicuro, non hanno ancora raggiunto la certezza matematica, non sono più un semplice tirare a indovinare, come avveniva solo un quarto di secolo fa.

Veramente affascinante e utile è il modo con cui oggi i meteorologi sono in grado di individuare e seguire gli uragani. Queste violente tempeste sono diventate molto più dannose che in passato, perché i litorali, dopo la seconda guerra mondiale, sono più densi di fabbricati e più popolati, e se non disponessimo di una conoscenza certa della posizione e degli spostamenti di questi uragani, vi sarebbero indubbiamente perdite di vite umane e di beni molto superiori a quelle che si verificano oggi. (A proposito della questione dell'utilità e del valore dei programmi spaziali, già la sola segnalazione degli uragani da parte dei satelliti basta a ripagare abbondantemente i costi di tali programmi.)

Sono state sviluppate altre utilizzazioni «terrestri» dei satelliti.

Già nel 1945 lo scrittore inglese di fantascienza Arthur C. Clarke aveva fatto notare che i satelliti avrebbero potuto essere usati come ripetitori per consentire ai messaggi radio di attraversare continenti e oceani, e che sarebbero stati sufficienti tre satelliti situati in posizioni strategiche per costituire una rete mondiale. Allora questo sembrava un sogno pazzesco, ma quindici anni dopo cominciò a diventare realtà. Il 12 agosto 1960 gli Stati Uniti lanciarono "Echo Prima", un sottile pallone di poliestere rivestito di alluminio, che venne gonfiato nello spazio fino a raggiungere un diametro di 30 metri, in modo che potesse fungere da riflettore passivo delle onde radio. Uno dei responsabili del fortunato progetto era quel John Robinson Pierce dei Bell Telephone Laboratories, che aveva, a sua volta, pubblicato racconti di fantascienza sotto uno pseudonimo.

Il 10 luglio 1962, "Telstar Primo" venne lanciato dagli Stati Uniti; esso faceva qualcosa di più che riflettere semplicemente: riceveva le onde, le amplificava e le ritrasmetteva. Come risultato i programmi televisivi riuscirono per la prima volta ad attraversare gli oceani (anche se, naturalmente, ciò non ne migliorava la qualità). Il 26 luglio 1963 "Syncom Secondo" fu posto in un'orbita a 36 mila chilometri dalla superficie della terra. Il suo periodo orbitale era esattamente di 24 ore; pertanto esso restava indefinitamente librato al di sopra dell'Oceano Atlantico, compiendo la sua rotazione in sincronia con la terra. "Syncom Terzo", collocato al di sopra dell'Oceano Indiano, anch'esso in sincronia con il moto della terra, ritrasmise i giochi olimpici dal Giappone agli Stati Uniti nell'ottobre del 1964.

Un satellite per le comunicazioni ancora più sofisticato, "Early Bird", venne lanciato il 6 aprile 1965; esso rendeva disponibili 240 linee telefoniche e un canale televisivo. (In quell'anno anche l'Unione Sovietica cominciò a inviare nello spazio satelliti per le comunicazioni.) Durante gli

anni settanta, grazie alla trasmissione via satellite, la televisione, la radio e la radiotelefonia hanno acquistato una dimensione planetaria. Dal punto di vista tecnologico, la terra è diventata un «mondo unico», e le forze politiche che lavorano in direzione opposta a questa realtà inevitabile diventano ogni giorno più arcaiche, anacronistiche e mortalmente pericolose.

Il fatto che i satelliti possano essere usati per realizzare mappe della superficie terrestre e per studiare le nubi è ovvio. Non altrettanto ovvio, ma assolutamente vero, è il fatto che i satelliti possono studiare i mantelli nevosi, gli spostamenti dei ghiacciai, le caratteristiche geologiche su grande scala. In base a tali caratteristiche geologiche è possibile individuare le regioni in cui è probabile l'esistenza del petrolio; è possibile studiare le colture su larga scala, come pure le foreste, individuando con precisione regioni in cui si notano anomalie o malattie; si possono localizzare gli incendi nei boschi, e individuare le zone bisognose d'irrigazione; si può studiare l'oceano, con le sue correnti e gli spostamenti dei pesci. Questi satelliti che studiano le risorse terrestri sono la migliore risposta a quei critici che deplorano l'alto costo delle imprese spaziali, citando tutti i problemi irrisolti «di casa nostra».

Spesso è proprio dallo spazio che si possono studiare meglio tali problemi, trovando la via per risolverli.

Infine, vi sono in orbita numerosi "satelliti spia", destinati a scoprire gli spostamenti militari, le concentrazioni di truppe, gli arsenali e così via. Non manca certo chi progetta di fare dello spazio un'ennesima arena di guerra, o di costruire "satelliti killer" aventi lo scopo di abbattere i satelliti nemici, o di portare nello spazio armi ad alta tecnologia, assai più fulminee di quelle terrestri.

Questo è il lato demoniaco dell'esplorazione spaziale, che tuttavia non può che accelerare in misura marginale i tempi con cui una guerra termonucleare globale potrebbe distruggere la civiltà.

Le due superpotenze, Stati Uniti e Unione Sovietica, dichiarano entrambe che loro scopo è «preservare la pace», scoraggiando l'altra parte dal fare la guerra. Questa teoria, secondo cui la pace verrebbe mantenuta in virtù della minaccia di una «reciproca distruzione assicurata», in quanto ciascuna delle due parti sa perfettamente che lo scoppio di una guerra porterebbe alla propria distruzione oltre che a quella dell'avversario, è pura pazzia, perché fino a oggi aumentare la quantità e la pericolosità degli armamenti non ha mai impedito le guerre.

I GAS PRESENTI NELL'ARIA.

GLI STRATI INFERIORI DELL'ATMOSFERA.

Prima dell'epoca moderna l'aria era considerata una sostanza semplice e omogenea; all'inizio del diciassettesimo secolo, il chimico fiammingo Jan Baptista van Helmont cominciò a sospettare che nell'aria vi fossero vari gas, chimicamente diversi; egli studiò il vapore emesso dalla fermentazione del succo di frutta ("anidride carbonica"), riconoscendovi una nuova sostanza. Van Helmont fu, in effetti, il primo a usare il termine "gas": si suppone che egli abbia coniato questa parola, nel 1620 circa, rifacendosi al termine greco "chaos", che indicava la sostanza originaria con cui è stato fatto l'universo.

Nel 1756 il chimico scozzese Joseph Black studiò a fondo l'anidride carbonica, stabilendo in modo preciso che si trattava di un gas diverso dall'aria, e dimostrando inoltre che ne esisteva nell'aria una modesta quantità. Dieci anni dopo Henry Cavendish studiò un gas infiammabile che non si trovava nell'atmosfera, a cui poi venne dato il nome di "idrogeno"; in tal modo era chiaramente dimostrata l'esistenza di più gas distinti tra loro.

Il primo a comprendere che l'aria era una miscela di vari gas fu il chimico francese Antoine-Laurent Lavoisier, negli anni successivi al 1770. In uno dei suoi esperimenti egli scoprì che, riscaldando in un recipiente chiuso una certa quantità di mercurio, essa si combinava con parte dell'aria, formando una polvere rossa ("ossido mercurico"), mentre i quattro quinti dell'aria rimanevano sotto forma gassosa. Per quanto si seguitasse a riscaldare, il volume di questo gas

residuo non diminuiva; inoltre, una candela introdotta in tale gas non bruciava e un topo non riusciva a sopravvivervi.

Lavoisier ne concluse che l'aria era costituita da due gas. La quinta parte che, nel suo esperimento, si combinava con il mercurio era la componente dell'aria che sosteneva la vita e consentiva la combustione, ed egli la denominò "ossigeno", mentre chiamò la parte residua "azoto", termine che in greco significa «senza vita».

Quest'ultimo fu chiamato, in diverse lingue, anche "nitrogeno", perché era presente nel nitrato di sodio, detto comunemente "nitro". Entrambi i gas erano stati scoperti nel decennio precedente, l'azoto nel 1772 dal medico scozzese Daniel Rutherford e l'ossigeno nel 1774 dal ministro della Chiesa unitaria inglese Joseph Priestley.

Già questo basta a dimostrare che l'atmosfera terrestre è unica nel sistema solare; oltre alla terra, sette mondi del sistema solare hanno un'atmosfera significativa, per quanto se ne sa. Giove, Saturno, Urano e Nettuno (i primi due certamente, gli ultimi due probabilmente) hanno un'atmosfera di idrogeno, con la presenza di piccole quantità di elio; Marte e Venere hanno atmosfere di anidride carbonica, con azoto come costituente secondario; Titano ha un'atmosfera di azoto con una scarsa presenza di metano; è solo la terra ad avere un'atmosfera costituita da due gas in parti quasi uguali, e solo sulla terra l'ossigeno è un componente importante: l'ossigeno è un gas attivo, così che, in base a semplici considerazioni di carattere chimico, ci si aspetterebbe che si combini con altri elementi, scomparendo dall'atmosfera in quanto gas libero; torneremo su questo punto più avanti, in questo stesso capitolo, seguitando per il momento a occuparci della composizione chimica dell'aria.

Verso la metà del diciannovesimo secolo il chimico francese Henri Victor Regnault aveva analizzato campioni di aria provenienti dalle più svariate parti del mondo e aveva scoperto che la composizione dell'aria era uguale ovunque: il contenuto di ossigeno era del 20,9 per cento, e si supponeva che tutto il resto fosse azoto, salvo una piccola traccia di anidride carbonica.

L'azoto è un gas relativamente inerte, non si combina cioè facilmente con altre sostanze; tale combinazione può però venir provocata: per esempio, riscaldandolo con magnesio metallico, si ottiene "nitruro di magnesio" solido. Alcuni anni dopo la scoperta di Lavoisier, Henry Cavendish cercò di eliminare tutto l'azoto, combinandolo con l'ossigeno sotto l'azione di una scarica elettrica, ma senza successo.

Pur provando in tutti i modi, non riusciva a liberarsi di una bollicina di gas residuo, meno dell'uno per cento della quantità originaria. Cavendish pensò che potesse trattarsi di un gas sconosciuto, ancora più inerte dell'azoto. Ma non tutti i chimici sono dei Cavendish, così che nessuno si occupò più dell'enigma e la natura di questo residuo non fu chiarita per un altro secolo.

Nel 1882 il fisico inglese Robert John Strutt, Lord Rayleigh, confrontò la densità dell'azoto ottenuto dall'aria con la densità dell'azoto ottenuto da determinate altre sostanze chimiche, e scoprì, con grande sorpresa, che quello proveniente dall'aria era decisamente più denso. Poteva forse darsi che l'azoto ottenuto dall'aria non fosse puro, ma contenesse piccole quantità di un altro gas più pesante? Un chimico scozzese, Sir William Ramsay, aiutò Lord Rayleigh a andare più a fondo nella faccenda, cosa che i due fecero ricorrendo all'aiuto della spettroscopia. Quando riscaldarono il piccolo residuo di gas rimasto dopo l'eliminazione dell'azoto dall'aria e ne esaminarono lo spettro, trovarono una nuova serie di righe luminose, che non appartenevano ad alcun elemento noto. Essi diedero il nome di "argo" (in greco «inerte») all'elemento appena scoperto, che era appunto altamente inerte.

L'argo rendeva ragione di quasi tutto quell'uno per cento di gas ignoto presente nell'aria; nell'atmosfera c'erano però anche tracce di diversi altri costituenti, ciascuno nella proporzione di qualche parte per milione. Durante gli anni successivi al 1890 Ramsay proseguì nelle sue ricerche e scoprì altri quattro gas inerti: il "neon" («nuovo»), il "cripto" («nascosto»), lo "xeno" («straniero») e l'"elio", che era stato identificato più di trent'anni prima nel sole. In epoca più recente lo spettroscopio per infrarosso ha rivelato la presenza di altri tre gas: il "protossido di azoto" (detto

«gas esilarante»), di provenienza sconosciuta, il "metano", un prodotto della decomposizione delle sostanze organiche e il "monossido di carbonio". Il metano proviene dalle esalazioni delle paludi; si è inoltre calcolato che ogni anno vengono immessi nell'atmosfera circa 40 milioni di tonnellate di questa sostanza, derivanti dalla emissione di gas intestinali da parte di bovini e altri animali di grosse dimensioni; il monossido di carbonio, probabilmente, è dovuto alle attività umane, provenendo dalla combustione incompleta di legno, carbone, benzina e altre sostanze simili.

LA STRATOSFERA.

Fin qui ci siamo occupati della composizione degli strati inferiori dell'atmosfera. Cosa si sa della stratosfera? Teisserenc de Bort pensava che potessero esservi presenti in quantità significative elio e idrogeno, che galleggiano sui gas più pesanti. Ma si sbagliava.

Verso la metà degli anni trenta i russi, avendo raggiunto in pallone l'alta stratosfera, ne riportarono dei campioni di aria, che risultarono composti di ossigeno e azoto nella stessa proporzione di 1 a 4 caratteristica dell'aria della troposfera.

Vi erano però ragioni per credere che nell'atmosfera superiore esistessero, ancora più in alto, degli strani gas; una di tali ragioni era il fenomeno della debole luminescenza diffusa ("airglow") che si osserva in tutto il cielo notturno, anche in assenza della luna; luminescenza che globalmente supera di molto quella delle stelle, ma è così diffusa che non la si nota a occhio nudo, mentre i sensibili strumenti fotometrici degli astronomi sono in grado di rivelarla.

Per molti anni l'origine di tale luminescenza rimase un mistero. Nel 1928 l'astronomo V. M. Slipher riuscì a individuare nella luce diffusa certe misteriose righe spettrali già trovate nel 1864 da William Huggins nelle nebulose; allora si era pensato che provenissero da un elemento sconosciuto, a cui era stato dato il nome di "nebulio". Ma nel 1927 l'astronomo americano Ira Sprague Bowen dimostrò sperimentalmente che le righe provenivano da "ossigeno atomico", cioè ossigeno sotto forma di singoli atomi anziché combinato nella normale molecola biatomica. Analogamente, si trovò che altre strane righe spettrali rilevate nelle aurore polari erano dovute ad azoto atomico.

L'ossigeno e l'azoto atomici sono prodotti nell'atmosfera superiore dalle radiazioni ad alta energia provenienti dal sole, le quali spezzano le molecole in atomi singoli - una spiegazione questa suggerita per la prima volta nel 1931 da Sydney Chapman.

Fortunatamente ciò fa sì che la radiazione ad alta energia venga assorbita, o almeno indebolita, prima di raggiungere l'atmosfera inferiore.

La luminescenza diffusa del cielo notturno proviene, secondo Chapman, dalla ricombinazione che avviene durante la notte degli atomi che vengono separati dall'energia solare durante il giorno.

Ricombinandosi, gli atomi cedono parte dell'energia che avevano assorbito nel separarsi, così che la luminescenza diffusa costituisce una sorta di restituzione differita e molto debole della luce solare in una forma nuova e particolare. Esperimenti effettuati nel 1956 - in laboratorio e, per mezzo di razzi, nell'atmosfera superiore - sotto la direzione di Murray Zelikoff hanno fornito conferma diretta di questa teoria. Spettroscopi trasportati nello spazio dai razzi registrarono le righe verdi dell'ossigeno atomico con la massima intensità all'altezza di 96 chilometri. La percentuale di azoto sotto forma di atomi liberi era più modesta, perché le molecole di azoto hanno un legame più stretto di quello delle molecole di ossigeno; purtuttavia la luce rossa dell'azoto atomico era intensa a un'altezza di 150 chilometri.

Slipher aveva anche trovato, nella luminescenza diffusa dell'atmosfera, alcune righe che lo avevano insospettito, perché erano molto simili alle ben note righe emesse dal sodio. La presenza del sodio sembrava così poco probabile che tutta la questione fu abbandonata fra molte perplessità. Cosa avrebbe mai dovuto farci proprio il sodio negli strati superiori dell'atmosfera? Dopo tutto non è un gas, ma un metallo molto reattivo che non si trova mai da solo sulla terra, ma sempre in combinazione con altri elementi, soprattutto sotto forma di "cloruro di sodio", il comune sale da

tavola. Nel 1938, però, gli scienziati francesi stabilirono che le righe erano davvero identiche a quelle del sodio. Per improbabile che fosse la cosa, doveva esserci del sodio nell'atmosfera superiore. Ancora una volta furono gli esperimenti consentiti dai razzi a risolvere la questione: gli spettroscopi di bordo registrarono inequivocabilmente la riga gialla del sodio con un massimo di intensità all'altezza di 88 chilometri. Resta tuttora un mistero da dove provenga questo sodio - forse da spruzzi di sale dell'oceano o dalla vaporizzazione delle meteore. È ancora più strano, poi, che anche il "litio" - un raro elemento affine al sodio - contribuisca all'effetto della luminescenza notturna diffusa, come fu scoperto nel 1958.

Nel corso dei loro esperimenti, Zelikoff e i suoi collaboratori produssero una luminescenza diffusa artificiale, lanciando un razzo che rilasciò ad alta quota una nube gassosa di ossido di azoto, capace di accelerare la ricombinazione degli atomi di ossigeno nell'atmosfera superiore. Gli osservatori a terra poterono facilmente scorgere il bagliore luminoso in tal modo prodotto. Analogo successo ebbe un esperimento simile condotto con il vapore di sodio, che diede origine a una luminescenza gialla, chiaramente visibile. Quando, nell'ottobre del 1959, gli scienziati sovietici inviarono nello spazio il "Lunik terzo" in direzione della luna, fecero in modo che esso espellesse una nube di vapori di sodio per segnalare visibilmente la propria entrata in orbita.

A livelli più bassi dell'atmosfera l'ossigeno atomico scompare, ma la radiazione solare ha ancora un'energia sufficiente a provocare la formazione dell'"ozono", la varietà triatomica dell'ossigeno. La concentrazione dell'ozono è massima all'altezza di 24 chilometri.

Anche lì, in quella che viene chiamata "ozonosfera" (scoperta nel 1913 dal fisico francese Charles Fabry), esso rappresenta una frazione dell'aria pari soltanto a una parte su 4 milioni, il che tuttavia è sufficiente ad assorbire la luce ultravioletta in misura bastante per proteggere la vita sulla terra.

L'ozono è formato dalla combinazione dell'ossigeno atomico (un atomo singolo) con le normali molecole di ossigeno (formate da due atomi).

Esso non si accumula in grandi quantità, perché è instabile: la molecola triatomica si spezza facilmente, dando origine alla molto più stabile forma biatomica, per azione della luce solare, del protossido d'azoto presente naturalmente in quantità minime nell'atmosfera e di altre sostanze chimiche. L'equilibrio tra la formazione e la scissione delle molecole di ozono determina la presenza costante nell'ozonosfera della piccola concentrazione sopra riferita, che costituisce uno scudo contro le radiazioni solari ultraviolette (le quali altrimenti spezzerebbero gran parte delle delicate molecole indispensabili alla vita) e che ha protetto la vita fin dall'epoca remota in cui l'ossigeno è entrato a far parte in quantità notevole dell'atmosfera terrestre.

L'ozonosfera non è molto al di sopra della tropopausa e varia di altezza allo stesso modo: è cioè più bassa ai poli e più elevata all'equatore. L'ozonosfera è più ricca di ozono ai poli e più povera all'equatore, dove l'effetto distruttivo della radiazione solare è maggiore.

Sarebbe molto pericoloso se la tecnologia umana dovesse produrre un'accelerazione del fenomeno di scissione dell'ozono nelle parti superiori dell'atmosfera, indebolendo così lo scudo costituito dall'ozonosfera. L'indebolimento di tale scudo farebbe aumentare la quantità di radiazione ultravioletta che raggiunge la superficie della terra, il che a sua volta causerebbe un aumento di incidenza del cancro della pelle - soprattutto tra le popolazioni di pelle chiara.

Si è stimato che una riduzione del 5 per cento della protezione assicurata dallo scudo di ozono potrebbe provocare, a livello mondiale, un aumento di 500 mila casi all'anno di cancro della pelle. Se aumentasse la concentrazione della radiazione ultravioletta, ne potrebbe risentire anche la vita microscopica alla superficie del mare ("plancton"), con probabili conseguenze catastrofiche, dato che il plancton costituisce la base della catena alimentare marina e, in una certa misura, anche terrestre.

Esiste in effetti un pericolo reale che la tecnologia umana possa compromettere l'ozonosfera: gli aerei a reazione volano sempre più numerosi nella stratosfera, mentre i razzi attraversano tutta l'atmosfera per raggiungere lo spazio esterno. Col tempo, le sostanze chimiche riversate

nell'atmosfera superiore dagli scarichi di questi veicoli potrebbero accelerare la scissione dell'ozono. Questa eventualità è stata usata come argomento contro lo sviluppo degli aerei supersonici, all'inizio degli anni settanta.

Nel 1974 si è scoperto, inaspettatamente, che le bombole spray potevano costituire un pericolo, in quanto vengono riempite di freon per ottenere la pressione necessaria a provocare la fuoriuscita, sotto forma di aerosol, del contenuto delle bombolette (per esempio deodoranti, prodotti per i capelli, profumi eccetera).

Il freon di per sé, dal punto di vista chimico, è il più innocuo dei gas immaginabili - incolore, inodore, inerte, non reattivo, senza alcun effetto sugli esseri umani. Allorché si cominciò a parlare di una sua possibile pericolosità, ne venivano immesse nell'atmosfera ogni anno, con l'uso di bombole o di congegni vari, qualcosa come 770 mila tonnellate.

Il gas, che non reagisce con nessuna sostanza, si diffonde lentamente nell'atmosfera, raggiungendo infine l'ozonosfera, dove potrebbe accelerare il processo di rottura dell'ozono. Questa eventualità fu prospettata in base a prove di laboratorio. Resta incerto se nelle condizioni esistenti nell'atmosfera superiore ciò possa avvenire realmente, ma anche la sola eventualità costituisce un rischio troppo grande per liquidare il problema superficialmente. L'uso di bombole spray che utilizzano il freon come propellente è diminuito decisamente da quando è sorta questa controversia.

Tuttavia, il freon viene usato in misura molto maggiore per il condizionamento dell'aria e la refrigerazione, dove non lo si è potuto abbandonare con altrettanta facilità e neppure lo si è potuto sostituire; pertanto l'ozonosfera seguita a essere in pericolo, perché il freon, una volta prodotto, è destinato a essere scaricato presto o tardi nell'atmosfera.

LA IONOSFERA.

L'ozono non è il solo costituente dell'atmosfera che a grande altezza si trovi in proporzioni molto maggiori che in prossimità della superficie terrestre. Ulteriori esperimenti effettuati mediante i razzi hanno mostrato che le ipotesi avanzate da Teisserenc de Bort sugli strati di elio e idrogeno non erano sbagliate, ma semplicemente collocavano tali strati fuori di posto. Dai 320 ai 1000 chilometri di altezza, dove l'atmosfera diventa talmente rarefatta da approssimarsi al vuoto, esiste uno strato di elio, oggi chiamato "eliosfera".

L'esistenza di tale strato venne dedotta per la prima volta nel 1961 dal fisico belga Marcel Nicolet in base all'effetto dell'attrito sul satellite "Echo Prima". Questa deduzione venne confermata quando si poté effettuare l'analisi del gas rarefatto tramite "Explorer Diciassettesimo", lanciato il 2 aprile 1963.

Al di sopra dell'eliosfera vi è uno strato ancora più tenue di idrogeno, la "protonosfera", che si estende verso l'alto forse per circa 65 mila chilometri, prima di svanire raggiungendo gradualmente la densità dello spazio interplanetario.

Le alte temperature e la radiazione ad alta energia possono fare molto di più che dissociare gli atomi di una molecola o provocarne nuove combinazioni. Possono strappare gli elettroni dagli atomi, "ionizzando" questi ultimi. Ciò che resta dell'atomo viene chiamato "ione", e differisce da un atomo normale per il fatto che è dotato di carica elettrica. Il termine ione fu introdotto negli anni trenta del diciannovesimo secolo dallo studioso inglese William Whewell e deriva da una parola greca che significa «viaggiante»; la ragione di tale nome sta nel fatto che quando una corrente elettrica attraversa una soluzione contenente degli ioni, gli ioni di carica positiva viaggiano in una direzione, mentre quelli di carica negativa migrano nella direzione opposta.

Un giovane chimico svedese, Svante August Arrhenius, fu il primo a suggerire, nel 1884, che gli ioni fossero atomi dotati di carica, per spiegare il comportamento, altrimenti incomprensibile, di certe soluzioni che conducevano la corrente elettrica. Le idee di Arrhenius, esposte nella sua tesi di dottorato presentata in quell'anno, erano talmente rivoluzionarie che gli esaminatori a fatica si risolsero a promuoverlo. Le particelle cariche all'interno dell'atomo non erano

ancora state scoperte, e l'idea di un atomo elettricamente carico appariva ridicola. Arrhenius conseguì il dottorato ma con il voto minimo.

Quando, sul finire del secolo scorso, venne scoperto l'elettrone (vedi capitolo sesto), improvvisamente la teoria di Arrhenius assunse un significato sorprendente. Nel 1903 gli fu assegnato il premio Nobel per la chimica per quella stessa tesi che diciannove anni prima aveva messo in pericolo il suo dottorato. (Tutto ciò, lo ammetto, potrebbe sembrare un'improbabile trama di film, ma la storia della scienza contiene molti episodi che fanno impallidire la fantasia hollywoodiana.)

La scoperta degli ioni nell'atmosfera avvenne solo dopo gli esperimenti di Guglielmo Marconi con il telegrafo senza fili. Quando, il 12 dicembre 1901, egli inviò dei segnali dalla Cornovaglia a Terranova attraverso 3400 chilometri di Oceano Atlantico, gli scienziati rimasero stupefatti: le onde radio viaggiano solo in linea retta; come avevano dunque potuto seguire la curvatura della terra, raggiungendo l'isola di Terranova?

Un fisico britannico, Oliver Heaviside, e un ingegnere elettrotecnico americano, Arthur Edwin Kennelly, suggerirono ben presto che i segnali radio potevano esser stati riflessi verso terra da uno strato di particelle cariche nella parte alta dell'atmosfera. Lo "strato di Kennelly-Heaviside", come venne chiamato in seguito, fu infine localizzato nel 1922. Il fisico inglese Edward Victor Appleton lo individuò mentre studiava uno strano fenomeno di affievolimento ("fading") nelle trasmissioni radiofoniche. Egli giunse alla conclusione che tale fenomeno era prodotto da un'interferenza tra due segnali aventi origine comune: uno che dal trasmettitore raggiungeva direttamente il ricevitore, l'altro che percorreva un cammino più lungo venendo riflesso dalla parte superiore dell'atmosfera. L'onda ritardata era sfasata rispetto alla prima, così che le due onde si cancellavano parzialmente, provocando il "fading".

A questo punto era facile trovare l'altezza dello strato riflettente; tutto ciò che Appleton doveva fare era inviare dei segnali di lunghezza d'onda tale che il segnale diretto cancellasse completamente quello riflesso, cioè tale che i due segnali arrivassero con fasi esattamente opposte. In base alla lunghezza d'onda del segnale usato e alla velocità nota delle radioonde, Appleton poté calcolare la differenza dei cammini percorsi dai due treni d'onda; in tal modo egli poté stabilire, nel 1924, che lo strato di Kennelly-Heaviside si trovava a un'altezza di circa 105 chilometri.

Il fading dei radiosegnali avveniva solitamente di notte. Nel 1926 Appleton scoprì che poco prima dell'alba le onde radio non venivano riflesse dallo strato di Kennelly-Heaviside, ma da strati ancora più alti (che oggi vengono talora chiamati "strati di Appleton"), che cominciano all'altezza di 225 chilometri.

Per tutte queste scoperte Appleton ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1947; era stato lui a localizzare l'importante regione dell'atmosfera chiamata "ionosfera" (termine introdotto nel 1930 dal fisico scozzese Robert Alexander Watson-Watt). La ionosfera include quelle che in seguito furono chiamate mesosfera e termosfera, e oggi viene suddivisa in strati. Dalla stratopausa fino a un'altezza di circa 105 chilometri, si estende la "regione D"; al di sopra di questa vi è lo strato di Kennelly-Heaviside, chiamato "strato D"; sopra questo strato, e fino a un'altezza di 225 chilometri, vi è la "regione E" - una zona intermedia relativamente povera di ioni. Seguono gli strati di Appleton: lo "strato F1", a 225 chilometri, e lo "strato F2" a 320; il primo è più ricco di ioni, mentre il secondo è significativamente ionizzato solo durante il giorno. Al di sopra di questi strati vi è la "regione F".

Questi strati riflettono e assorbono solo le onde radio lunghe, usate normalmente per le trasmissioni radiofoniche, mentre le onde più corte, per esempio quelle usate nelle trasmissioni televisive, per la maggior parte li attraversano. È questa la ragione che limita la portata delle trasmissioni televisive - limite a cui si è posto rimedio collocando in orbita alcuni satelliti che fungono da ripetitori, permettendo le trasmissioni televisive in diretta attraverso oceani e continenti. Anche le radioonde provenienti dallo spazio (per esempio dalle radio-stelle) possono attraversare la

ionosfera: è una fortuna, perché altrimenti non sarebbe possibile la radioastronomia dalla superficie terrestre.

La ionosfera è più efficace verso sera, dopo che ha subìto l'effetto della radiazione solare per tutto l'arco della giornata, mentre si affievolisce verso l'alba, quando molti ioni ed elettroni si sono ricombinati. Le tempeste solari, intensificando il flusso di particelle e di radiazione ad alta energia inviato verso la terra, aumentano il grado di ionizzazione e lo spessore degli strati ionizzati. Anche le zone al di sopra della ionosfera si accendono di bagliori dando origine a manifestazioni aurorali. Durante queste tempeste elettriche la trasmissione a grande distanza delle onde radio sulla terra è estremamente disturbata, e talvolta anche del tutto impedita.

Si è poi scoperto che la ionosfera non è che una delle fasce di radiazione che circondano la terra. Al di fuori dell'atmosfera, in quello che veniva considerato «spazio vuoto», nel 1958 i satelliti scoprirono qualcosa di veramente sorprendente: ma per comprendere di che cosa si trattasse, occorre prima fare una breve digressione sul magnetismo.

I MAGNETI.

I magneti hanno preso nome dall'antica città greca di Magnesia, presso la quale furono scoperte le prime "magnetiti". La magnetite (o calamita naturale) è un ossido di ferro che ha proprietà magnetiche naturali. La tradizione vuole che Talete di Mileto sia stato il primo filosofo a descriverla, attorno al 550 avanti Cristo.

MAGNETISMO ED ELETTRICITÀ.

I magneti diventarono qualcosa di più di una semplice curiosità quando si scoprì che un ago di acciaio messo a contatto con una calamita restava magnetizzato e che, lasciato libero di ruotare in un piano orizzontale, esso finiva col disporsi approssimativamente lungo la direzione nord-sud. Naturalmente tale ago risultò di enorme utilità per i naviganti; esso divenne praticamente indispensabile per la navigazione oceanica, anche se i polinesiani riuscirono ad attraversare il Pacifico da isola a isola senza bussola.

Non sappiamo chi fu il primo a collocare un ago magnetizzato su un perno e a chiuderlo in un contenitore, realizzando una bussola. Si dice che i primi a farlo furono i cinesi, che avrebbero trasmesso la loro invenzione agli arabi, i quali, a loro volta, l'avrebbero comunicata agli europei. Ma si tratta di notizie dubbie, forse solo di una leggenda. Ad ogni modo, nel dodicesimo secolo la bussola entrò nell'uso comune in Europa, e nel 1269 uno studioso francese, più noto con il nome latinizzato di Petrus Peregrinus, la descrisse dettagliatamente. Peregrinus chiamò "polo nord" e "polo sud" i due estremi del magnete che puntano rispettivamente verso i punti cardinali nord e sud.

Naturalmente ci si chiese la ragione per cui un ago magnetizzato punta verso il nord. Poiché si sapeva che i magneti si attraggono tra loro, qualcuno pensò che esistesse, all'estremo nord, una gigantesca montagna di magnetite verso cui tendeva l'ago. (Nelle "Mille e una notte", il racconto di Sindbad il Marinaio ricorre all'immagine di questa montagna, sortendo un grande effetto letterario.) Altri si dimostrarono ancora più fantasiosi, attribuendo ai magneti un'«anima» e una sorta di vita.

Lo studio scientifico dei magneti iniziò con William Gilbert, il medico di corte della regina Elisabetta Prima; fu Gilbert a scoprire che la terra stessa è un gigantesco magnete. Egli montò un ago magnetizzato in modo che potesse ruotare in un piano verticale ("bussola di inclinazione"): il polo nord dell'ago si orientò verso il suolo ("inclinazione magnetica"). Usando una calamita sferica come modello della terra, Gilbert trovò che l'ago si comportava allo stesso modo quando era situato sull'emisfero settentrionale della sua sfera. Gilbert pubblicò i risultati dei suoi esperimenti nel 1600 in un'opera classica, intitolata "De Magnete".

Gli scienziati discussero a lungo la possibilità che la terra avesse come nucleo un gigantesco magnete naturale. Pur essendo risultato vero che la terra ha un nucleo di ferro, oggi si sa che esso

non può sicuramente essere un magnete, perché il ferro, riscaldato, perde le sue intense proprietà magnetiche ("ferromagnetismo") a 760 gradi C, mentre la temperatura del nucleo terrestre deve essere di almeno 1000 gradi C.

La temperatura alla quale una sostanza perde le proprietà magnetiche viene chiamata "temperatura di Curie", essendo stata scoperta da Pierre Curie nel 1895. Anche il cobalto e il nichel, che hanno una stretta somiglianza con il ferro sotto molti aspetti, sono ferromagnetici. Per il nichel la temperatura di Curie è di 356 gradi C, per il cobalto di 1075 gradi C. Alle basse temperature, anche alcuni altri metalli sono ferromagnetici; per esempio lo è il disprosio, sotto i meno 188 gradi C.

In generale il magnetismo è una proprietà intrinseca dei singoli atomi; ma in quasi tutti i materiali i minuscoli magneti atomici sono orientati in modo casuale, il che causa l'eliminazione reciproca quasi completa dell'effetto; ciononostante, spesso si nota ancora la presenza di deboli proprietà magnetiche, che vanno sotto il nome di "paramagnetismo". L'intensità del magnetismo viene espressa in termini di "permeabilità": la permeabilità del vuoto è 1,00, mentre quella delle sostanze paramagnetiche è compresa tra 1,00 e 1,01.

Le sostanze ferromagnetiche hanno permeabilità molto maggiori. Il nichel ha una permeabilità pari a 40, il cobalto a 55, il ferro dell'ordine delle migliaia. Nel 1907 il fisico francese Pierre Weiss postulò l'esistenza in tali sostanze di "domini", cioè di piccolissime zone, con un diametro compreso fra 0,001 e 0,1 centimetri (che sono state effettivamente osservate), entro le quali i magneti atomici sono allineati in modo da rinforzarsi a vicenda, producendo dei campi totali intensi. Nel comune ferro non magnetizzato, questi domini sono orientati in modo casuale, e annullano l'uno gli effetti dell'altro.

Quando invece i domini vengono orientati parallelamente dall'azione di un altro magnete, il ferro risulta magnetizzato. Il riorientamento dei domini durante la magnetizzazione produce effettivamente schiocchi e sfrigolii di assestamento che possono essere rilevati con un'opportuna amplificazione; essi costituiscono l'"effetto Barkhausen", dal nome del loro scopritore, il fisico tedesco Heinrich Barkhausen.

Anche nelle "sostanze antiferromagnetiche", come il manganese, i domini si allineano, ma in direzioni alternate, il che elimina quasi del tutto il magnetismo; al di sopra di una data temperatura, le sostanze perdono l'antiferromagnetismo, diventando paramagnetiche.

Se il nucleo di ferro della terra non è esso stesso un magnete permanente, a causa della sua temperatura superiore a quella di Curie, si deve trovare un'altra spiegazione dell'azione della terra sull'ago della bussola. Tale spiegazione cominciò a emergere in conseguenza delle scoperte dello scienziato inglese Michael Faraday sulla relazione tra magnetismo ed elettricità.

Nel secondo decennio del secolo scorso, Faraday prese le mosse da un esperimento che era stato in precedenza descritto da Petrus Peregrinus, e che ancora oggi costituisce una fonte di divertimento per i giovani studenti di fisica. Esso consiste nel cospargere di una fine limatura di ferro un foglio di carta posto sopra a una calamita, dando poi dei leggeri colpetti al foglio stesso: la limatura così scossa tende ad allinearsi formando degli archi diretti dal polo nord al polo sud del magnete. Faraday affermò che questi archi indicavano delle vere e proprie "linee di forza magnetiche", formanti un "campo magnetico".

Faraday aveva iniziato a indagare sul fenomeno del magnetismo in seguito agli studi del fisico danese Hans Christiaan Oersted. Avendo quest'ultimo scoperto, in un suo esperimento del 1820, che una corrente elettrica che percorre un filo metallico posto nelle vicinanze di una bussola ne fa deviare l'ago, Faraday giunse alla conclusione che la corrente dovesse generare delle linee di forza magnetiche intorno al filo metallico stesso.

La sua convinzione si era rafforzata anche per gli studi sui conduttori effettuati dal fisico francese André Marie Ampère subito dopo la scoperta di Oersted. Ampère aveva dimostrato che due conduttori paralleli in cui la corrente scorreva nella stessa direzione si attraevano tra loro, mentre si respingevano se la corrente scorreva in direzioni opposte. Ciò ricordava da vicino quanto

avviene tra due poli magnetici, che si respingono se uguali (entrambi poli nord o entrambi poli sud), e si attirano se opposti. Ma Ampère andò oltre dimostrando che una bobina cilindrica di filo metallico ("solenoide") in cui veniva fatta passare una corrente elettrica si comportava come una sbarra magnetica. È in ricordo di questo suo lavoro che, nel 1881, l'unità di misura dell'intensità di corrente elettrica è stata ufficialmente denominata "ampère".

Stando così le cose, rifletté Faraday (e la sua fu una delle più feconde intuizioni della storia della scienza), se l'elettricità può indurre un campo magnetico tanto simile a quello di un magnete reale che dei fili metallici percorsi dalla corrente si comportano come vere e proprie calamite, perché non dovrebbe valere anche l'inverso? Perché un magnete non dovrebbe indurre una corrente elettrica, del tutto simile alla corrente prodotta da una batteria chimica?

Nel 1831, Faraday eseguì un esperimento che doveva cambiare la storia dell'umanità. Avvolse a spirale un filo metallico intorno a un segmento di un anello di ferro, e un secondo filo intorno a un altro segmento dello stesso anello; poi collegò la prima spirale a una batteria. Il suo ragionamento era il seguente: quando una corrente avesse percorso la prima spirale, si sarebbero create delle linee di forza magnetica che si sarebbero concentrate nell'anello di ferro, e questo magnetismo indotto avrebbe dovuto, a sua volta, produrre una corrente nel secondo avvolgimento. Per rivelare la presenza di tale corrente, Faraday collegò la seconda spirale a un "galvanometro" - uno strumento per misurare le correnti elettriche, che era stato ideato dal fisico tedesco Johann Salomon Christoph Schweigger nel 1820.

L'esperimento non ebbe l'esito previsto da Faraday: il flusso di corrente nel primo avvolgimento non generò nulla nel secondo. Tuttavia, Faraday notò che l'ago del galvanometro, nel momento in cui egli aveva fatto passare la corrente, si era leggermente mosso, e che lo stesso era avvenuto, ma in direzione opposta, quando egli aveva tolto la corrente. Immediatamente formulò l'ipotesi che a provocare la corrente fosse il movimento delle linee di forza magnetiche concatenate al filo metallico, e non il magnetismo in se stesso.

Quando una corrente cominciava a passare nel primo avvolgimento, essa originava un campo magnetico, che, propagandosi, tagliava la seconda spirale, inducendovi una corrente elettrica istantanea. Inversamente, quando si interrompeva la corrente della batteria, le linee di forza magnetiche venivano meno e di nuovo tagliavano il filo del secondo avvolgimento, provocando un breve impulso di corrente in direzione opposta a quella del flusso precedente.

Faraday aveva così scoperto il principio dell'induzione elettrica e creato il primo "trasformatore". Egli proseguì i suoi esperimenti, dando una dimostrazione più evidente del fenomeno con il ricorso a un magnete permanente, che spostava dentro e fuori da un solenoide; benché non fosse presente alcuna fonte di elettricità, una corrente passava nel filo tutte le volte che esso intersecava le linee di forza del magnete.

Le scoperte di Faraday non solo portarono direttamente alla creazione della dinamo per la produzione di elettricità, ma posero anche le basi su cui poi James Clerk Maxwell eresse la propria teoria "elettromagnetica", che collegava la luce con altre forme di radiazione (come le onde radio) in un'unica famiglia, quella delle "radiazioni elettromagnetiche".

IL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE.

La stretta relazione tra magnetismo ed elettricità fornisce una possibilità di spiegare il magnetismo terrestre. L'ago della bussola ha messo in evidenza le linee di forza del campo magnetico terrestre, che vanno dal "polo magnetico nord", situato a nord del Canada, al "polo magnetico sud", situato al limite dell'Antartide: i due poli si trovano entrambi a circa 15 gradi di latitudine dai poli geografici. (Il rilevamento del campo magnetico terrestre è stato effettuato anche a grande altezza mediante razzi forniti di "magnetometri".) L'idea nuova è che il magnetismo terrestre dipenda dalla presenza di correnti elettriche che scorrono in profondità all'interno della terra.

Il fisico Walter Maurice Elsasser ha proposto che la rotazione della terra produca, nel nucleo di ferro fuso, dei lenti vortici in direzione ovest-est. Questi vortici avrebbero l'effetto di generare una corrente elettrica, anch'essa diretta da ovest verso est; la corrente elettrica circolante produrrebbe delle linee di forza magnetiche nel nucleo terrestre, esattamente come avveniva nell'esperimento di Faraday: si originerebbe così l'equivalente di un magnete interno orientato in direzione nord-sud. Questo magnete, a sua volta, spiegherebbe la presenza del campo magnetico generale della terra, orientato approssimativamente lungo l'asse di rotazione, in modo che i poli magnetici risultano vicini ai poli geografici.

Anche il sole ha un campo magnetico globale, che ha un'intensità doppia o tripla di quella del campo magnetico terrestre; inoltre esso presenta campi magnetici locali, che sembrano essere associati alle macchie solari: questi ultimi sono migliaia di volte più intensi. Studi effettuati su questi campi (resi possibili dal fatto che un intenso campo magnetico altera la lunghezza d'onda della luce emessa) fanno pensare che all'interno del sole possano esservi flussi circolari di cariche elettriche.

In effetti, molte caratteristiche enigmatiche delle macchie solari potrebbero essere chiarite una volta che si fossero decifrate le cause dei campi magnetici su scala astronomica. Le macchie solari appaiono solo a certe latitudini, ma, durante un ciclo, queste latitudini mutano. Le macchie presentano un dato orientamento magnetico, che si inverte a ogni nuovo ciclo, così che il ciclo completo da un massimo con un orientamento magnetico a un massimo successivo con lo stesso orientamento magnetico, dura in media circa 21 anni. Le ragioni di queste attività delle macchie solari non sono ancora note.

Ma non occorre andare sul sole per trovare misteri relativi ai campi magnetici. I problemi abbondano anche qui, sulla terra. Per esempio, perché i poli magnetici non coincidono con quelli geografici? Il polo magnetico nord dista circa 1600 chilometri dal polo nord, e lo stesso accade per il polo sud. Inoltre i poli magnetici non sono diametralmente opposti: la linea che li congiunge ("asse magnetico") non passa per il centro della terra.

Per di più, la deviazione dell'ago della bussola rispetto al vero nord (cioè alla direzione del polo nord) varia in modo irregolare quando ci si sposta verso est o verso ovest. Durante il primo viaggio di Colombo l'ago della bussola presentò proprio tale fenomeno - circostanza che egli tenne nascosta per evitare che il suo equipaggio cadesse in preda al terrore e lo obbligasse a ritornare indietro.

Questa è una delle ragioni per cui l'uso della bussola magnetica per determinare la direzione è tutt'altro che soddisfacente. Nel 1911 l'inventore americano Elmer Ambrose Sperry introdusse un metodo per stabilire la direzione che, anziché basarsi sul magnetismo, si fondava sul fatto che una ruota con il bordo pesante in rapida rotazione (un "giroscopio", studiato per la prima volta da quello stesso Foucault che aveva dimostrato che la terra gira) tende a opporre resistenza a qualsiasi mutamento del piano di rotazione; tale tendenza può essere sfruttata per ottenere una "bussola giroscopica", che conserva l'orientamento verso una data direzione e può fungere da guida per navi e razzi.

Pur essendo lungi dalla perfezione, la bussola magnetica è stata utilizzata vantaggiosamente dagli esseri umani per secoli; della deviazione dell'ago magnetico dal vero nord si può tener conto. Un secolo dopo Colombo, nel 1581, l'inglese Robert Norman preparò la prima mappa che indicava la direzione reale assunta dall'ago della bussola ("declinazione magnetica") in diverse parti del mondo. Le linee che uniscono i punti del pianeta aventi la stessa declinazione ("isogone") vanno in modo irregolare dal polo nord magnetico al polo sud magnetico.

Sfortunatamente queste mappe vanno aggiornate periodicamente, perché la declinazione magnetica muta col tempo anche in uno stesso luogo; per esempio, la declinazione a Londra si spostò di 32 gradi di arco in due secoli: mentre nel 1600 era, rispetto al nord, di 8 gradi a est, seguitò poi a ruotare in senso antiorario fino a disporsi, nel 1800, a 24 gradi a ovest. In seguito ha ripreso a spostarsi in senso opposto, così che nel 1950 era di soli 8 gradi a ovest.

Anche l'inclinazione magnetica muta lentamente nel tempo in ogni luogo della terra, così che anche le mappe delle linee che uniscono punti con uguale inclinazione ("isocline") devono essere aggiornate di continuo. Inoltre, l'intensità del campo magnetico terrestre aumenta con la latitudine: vicino ai poli magnetici è tre volte maggiore che nelle regioni equatoriali. A sua volta, questa intensità cambia continuamente, così che anche le mappe delle "isodinamiche" vanno continuamente aggiornate.

Come tutto quanto riguarda il campo magnetico, anche l'intensità globale del campo è variabile. Da qualche tempo essa va diminuendo. Il campo ha perso il 15 per cento della sua intensità totale dal 1670; se tale diminuzione continuasse, l'intensità si ridurrebbe a zero verso l'anno 4000. Cosa accadrebbe poi? Continuerebbe a diminuire, subendo un'inversione, cioè presentando il polo magnetico nord nell'Antartide e quello sud nell'Artico? In altri termini, il campo magnetico terrestre è soggetto a un ciclo periodico durante il quale diminuisce, si inverte, aumenta, torna a diminuire, si inverte nuovamente, e così via?

Un metodo per rispondere a questa domanda ci è offerto dallo studio delle rocce vulcaniche. Quando la lava si raffredda, i cristalli che si formano risultano allineati con il campo magnetico. Già nel 1906 il fisico francese Bernard Brunhes aveva osservato che alcune rocce erano magnetizzate in direzione "opposta" a quella attuale del campo magnetico terrestre; tale scoperta fu quasi ignorata ai suoi tempi, perché sembrava irragionevole; oggi però la cosa è accettata in modo generale. Le rocce sono rivelatrici: esse non solo ci informano del fatto che il campo magnetico terrestre si è invertito, ma ci dicono anche che lo ha fatto molte volte: nove volte negli ultimi 4 milioni di anni, a intervalli irregolari.

La scoperta più spettacolare a questo proposito riguarda il fondale oceanico. Se è vero che roccia fusa fuoriesce attraverso il Rift Globale e si raffredda sui suoi due lati, allora, spostandosi verso est o verso ovest rispetto al Rift, si devono trovare rocce che si sono solidificate in tempi sempre più remoti. Studiando l'allineamento magnetico si trovano effettivamente, via via che ci si allontana dal Rift, fasce di opposto orientamento alternate a intervalli corrispondenti a periodi variabili fra 50 mila e 20 milioni di anni.

La distribuzione di tali fasce è specularmente identica sui due lati del Rift. L'unica spiegazione razionale trovata finora è quella di ammettere tanto l'espansione del fondale marino quanto le ripetute inversioni del campo magnetico.

Accertata la realtà dell'inversione rimane comunque l'enigma delle ragioni per cui essa avviene.

Oltre agli spostamenti a lungo termine del campo magnetico, si verificano anche alcune lievi variazioni giornaliere: ciò fa pensare a qualche relazione con il sole. Vi sono poi dei "giorni perturbati", in cui l'ago della bussola salta qua e là con insolita vivacità. In questi casi, si usa dire che la terra sta attraversando una "tempesta magnetica". Le tempeste magnetiche sono identiche alle tempeste elettriche; solitamente sono accompagnate da un aumento dell'intensità delle manifestazioni aurorali - una connessione questa osservata già nel 1759 dal fisico inglese John Canton.

L'"aurora boreale" (espressione introdotta nel 1621 dal filosofo francese Pierre Gassendi) è uno splendido spettacolo, caratterizzato da mutevoli strisce di luce dei più svariati colori, che producono un effetto di una magnificenza soprannaturale. Il fenomeno corrispondente nell'Antartide viene detto "aurora australe". Nel 1741 l'astronomo svedese Anders Celsius notò una relazione tra aurore polari e campo magnetico terrestre. Le bande luminose delle aurore sembrano seguire le linee di forza del campo magnetico terrestre, concentrandosi e diventando visibili proprio là dove tali linee di forza si infittiscono, avvicinandosi maggiormente tra loro - cioè ai poli magnetici. Durante le tempeste magnetiche, l'aurora boreale diventa visibile anche a latitudini molto più basse, come quelle di Boston e New York.

Non fu dunque difficile capire le cause dell'aurora polare. Dopo la scoperta della ionosfera, si comprese che qualcosa (presumibilmente qualche tipo di radiazione solare) forniva energia agli

atomi nella parte superiore dell'atmosfera, convertendoli in ioni elettricamente carichi. Di notte gli ioni perdevano la carica e l'energia: era quest'ultima a rendersi visibile sotto forma di luce aurorale. Si trattava di una forma particolare di luminescenza atmosferica, che seguiva le linee di forza magnetiche, concentrandosi vicino ai poli magnetici, come vi era da aspettarsi da parte degli ioni, che sono elettricamente carichi. (Invece l'ordinaria luminescenza diffusa non risente del campo magnetico, perché è dovuta ad atomi privi di carica elettrica.)

IL VENTO SOLARE.

Come spiegare, però, i giorni di perturbazione e le tempeste magnetiche? I sospetti si addensavano ancora una volta sul sole.

A quanto pare, l'attività delle macchie solari dà origine alle tempeste magnetiche. Non è facile capire come una perturbazione che avviene a 150 milioni di chilometri di distanza possa avere un effetto sulla terra, ma le cose devono stare così, perché queste tempeste sono particolarmente comuni quando l'attività delle macchie solari è intensa.

Il primo indizio chiarificatore si presentò nel 1859, quando un astronomo inglese, Richard Christopher Carrington, osservò un punto luminoso, simile a una stella, che si accese in prossimità della superficie solare, brillò per 5 minuti e poi diminuì di intensità.

Questa è la prima osservazione di un "brillamento solare" di cui si abbia notizia. Carrington suppose che una grossa meteora fosse caduta sul sole, e ritenne il fenomeno del tutto eccezionale.

Tuttavia, nel 1889 George E. Hale inventò lo "spettroeliografo" che permetteva di fotografare il sole nella luce di una particolare regione dello spettro. Con questo strumento divenne facile registrare i brillamenti solari, e si vide che essi sono un fenomeno normale, collegato con le regioni in cui sono attive le macchie. Evidentemente i brillamenti solari sono eruzioni di insolita violenza, che in qualche modo chiamano in causa gli stessi fenomeni che producono le macchie solari (e pertanto ancora non si conosce la loro causa).

Quando il brillamento avviene nelle vicinanze del centro del disco solare, esso si trova proprio di fronte alla terra, e tutto ciò che ne viene emesso si muove proprio in direzione della terra. È stato accertato che a questi brillamenti centrali seguono, dopo pochi giorni, le tempeste magnetiche sulla terra, allorché le particelle espulse dal sole raggiungono gli strati superiori dell'atmosfera terrestre. Una spiegazione di questo genere era stata proposta fin dal 1896 dal fisico norvegese Olaf Kristian Birkeland.

Ormai erano state raccolte numerose prove che mostravano che di fatto la terra è immersa in un alone di particelle di incerta provenienza, che si estende fino a grandi distanze nello spazio. Si era scoperto che le onde radio provocate dai lampi viaggiano lungo le linee di forza magnetiche terrestri fino a grandi altezze. (Queste onde vennero chiamate "whistlers" [sibili], perché i ricevitori le captavano come strani rumori, simili a fischi, e furono scoperte per caso dal fisico tedesco Heinrich Barkhausen durante la prima guerra mondiale.) Le onde radio non avrebbero potuto seguire le linee di forza, in assenza di particelle cariche.

Non sembrava, però, che queste particelle cariche venissero emesse dal sole soltanto a tratti. Nel 1931, mentre studiava la corona solare, Sydney Chapman scoprì con crescente stupore quanto essa fosse estesa.

Quella che noi riusciamo a scorgere durante un'eclissi totale di sole non è che la sua parte più interna. Chapman pensò che forse le concentrazioni di particelle cariche rilevabili nelle vicinanze della terra facevano parte della corona. Allora, in un certo senso, la terra gira intorno al sole all'interno di questa sua atmosfera esterna estremamente rarefatta. Chapman tracciò un quadro della corona che si espande nello spazio verso l'esterno e si rinnova continuamente alla superficie del sole. Vi sarebbe, a partire dal sole, un continuo flusso di particelle cariche in tutte le direzioni; e sarebbero queste particelle a perturbare il campo magnetico terrestre quando lo attraversano.

Questa conclusione divenne praticamente inevitabile negli anni cinquanta, grazie al lavoro dell'astrofisico tedesco Ludwig Franz Biermann. Per mezzo secolo si era ritenuto che le code delle comete, che sono sempre rivolte in direzione opposta al sole e si allungano via via che la cometa si avvicina a quest'ultimo, fossero dovute alla pressione della luce proveniente dal sole. Questa pressione della luce esiste effettivamente, ma Biermann mostrò che è di gran lunga troppo piccola per poter produrre le code delle comete; occorreva qualcosa capace di esercitare un'azione più efficace, e questo qualcosa difficilmente avrebbe potuto essere altro che un flusso di particelle cariche. Il fisico americano Eugene Norman Parker portò altri argomenti a favore di un'emissione costante di particelle, che si intensificasse saltuariamente al momento dei brillamenti solari, e nel 1958 chiamò questo effetto "vento solare". L'esistenza di tale vento solare fu definitivamente dimostrata dai satelliti sovietici "Lunik Primo" e "Lunik Secondo", che giunsero in vicinanza della luna nel 1959 e nel 1960, e dalla sonda planetaria americana "Mariner Secondo", che nel 1962 passò vicino a Venere.

Il vento solare non è un fenomeno locale; c'è ragione di credere che esso mantenga una densità sufficiente per essere rilevabile almeno fino all'orbita di Saturno. In vicinanza della terra la velocità delle particelle del vento solare varia da 350 a 800 chilometri al secondo, ed esse impiegano tre giorni e mezzo per raggiungere la terra partendo dal sole. Il vento solare sottrae al sole un milione di tonnellate di materia al secondo - perdita che, sebbene grande in termini umani, è del tutto insignificante rispetto alla massa solare. La densità del vento solare è circa un quintilionesimo di quella della nostra atmosfera; in tutta la durata della vita del sole, la sua massa è diminuita meno di un centesimo dell'1 per cento a causa del vento solare.

Può darsi benissimo che il vento solare eserciti un'influenza sulla nostra vita quotidiana. Oltre all'effetto sul campo magnetico, le particelle cariche negli strati superiori dell'atmosfera potrebbero anche influire sul clima terrestre. Se così stanno veramente le cose, lo studio del flusso e riflusso del vento solare offre un'altra possibilità di migliorare le previsioni meteorologiche.

LA MAGNETOSFERA.

Il lancio dei satelliti artificiali portò alla scoperta di un effetto imprevisto del vento solare, e ciò nel modo più inaspettato. Uno dei compiti principali affidati ai satelliti era quello di misurare la radiazione nell'atmosfera superiore e nello spazio a essa contiguo, in particolare l'intensità dei "raggi cosmici" (particelle cariche dotate di energia molto elevata). Qual era l'intensità di tale radiazione al di sopra dello scudo costituito dall'atmosfera? I satelliti trasportavano dei "contatori Geiger" (ideati dal fisico tedesco Hans Geiger nel 1907, e molto migliorati nel 1928), atti a misurare la radiazione formata da particelle. Il contatore Geiger contiene un gas sottoposto a una tensione elettrica di poco inferiore a quella necessaria per provocare un passaggio di corrente attraverso il gas stesso; quando una particella ad alta energia penetra nel contenitore del gas, converte un suo atomo in uno ione. Quest'ultimo, animato dall'energia fornitagli dalla collisione, urta a sua volta gli atomi vicini, convertendoli in ioni, e questi a loro volta colpiscono ulteriori atomi e così via. Lo sciame di ioni che ne risulta è in grado di far passare una corrente elettrica, così che per una frazione di secondo il contatore registra un impulso di corrente; questo impulso viene rinviato a terra con le consuete tecniche di telemisura; così lo strumento conta le particelle, ovvero il flusso di radiazione, nel punto in cui si trova.

Quando il primo satellite americano, l'"Explorer Primo", entrò in orbita il 31 gennaio 1958, il suo contatore misurò più o meno le concentrazioni di particelle previste, fino ad altezze di varie centinaia di chilometri. Ma a un'altezza maggiore (la traiettoria di "Explorer Primo" raggiungeva i 2500 chilometri di altezza) il conteggio diminuì, anzi in certi momenti scese addirittura a zero! Ciò avrebbe potuto esser considerato un incidente dovuto a un cattivo funzionamento di quel particolare contatore, ma lo stesso accadde con "Explorer Terzo" (lanciato il 26 marzo 1958), il cui apogeo era

a quasi 3400 chilometri. E altrettanto si verificò con lo "Sputnik Terzo" sovietico, lanciato il 15 maggio 1958.

James A. Van Allen dell'Università dello stato dello Jowa, che era il responsabile del programma di studio sulle radiazioni, giunse, con i suoi collaboratori, a proporre la seguente possibile spiegazione: il conteggio era sceso praticamente a zero non già perché la radiazione fosse scarsa o nulla, ma perché era troppa. Lo strumento non riusciva a stare al passo con le particelle che vi penetravano, e pertanto «impazziva» - un fenomeno analogo a quello che accade ai nostri occhi, quando, abbagliati da una luce troppo forte, restano momentaneamente accecati.

Il 26 luglio 1958 fu messo in orbita "Explorer Quarto", che trasportava dei contatori speciali, progettati per far fronte a notevoli sovraccarichi; per esempio uno di essi era schermato da un sottile strato di piombo (analogo ai nostri occhiali scuri) per impedire l'ingresso di gran parte della radiazione. Questa volta i contatori si comportarono diversamente: essi mostrarono che la teoria della «radiazione eccessiva» era esatta. Raggiunta un'altezza di 2200 chilometri, l'"Explorer Quarto" trasmise a terra dei conteggi che, una volta tenuto conto della presenza dello schermo di piombo, indicavano un'intensità della radiazione assai superiore a quella immaginata dagli scienziati.

In seguito apparve chiaro che i satelliti "Explorer" erano penetrati solo nelle regioni inferiori di questo intenso campo di radiazione. Nell'autunno del 1958 i due satelliti lanciati dagli Stati Uniti in direzione della luna (le cosiddette "sonde lunari") - "Pioneer Primo", che si spinse fino a 112 mila chilometri e "Pioneer Terzo", che raggiunse i 104 mila - mostrarono l'esistenza di due bande principali di radiazione che circondavano la terra. Esse furono chiamate "fasce di Van Allen", ma in seguito il nome fu cambiato in quello di "magnetosfera", per analogia con le altre denominazioni che indicano le varie regioni dello spazio in vicinanza della terra.

Sulle prime si credette che la magnetosfera fosse disposta simmetricamente rispetto alla terra, un po' come un'enorme ciambella, e che anche le linee di forza magnetiche fossero disposte in modo simmetrico; quest'idea fu contraddetta dai dati riportati in seguito dai satelliti. Nel 1963, in particolare, i satelliti "Explorer Quattordicesimo" e "Imp-I" furono immessi in orbite altamente ellittiche, nel tentativo di farli giungere al di là della magnetosfera.

Si scoprì che la magnetosfera possiede un confine netto, la "magnetopausa", che si avvicina alla terra, dalla parte rivolta verso il sole, per effetto del vento solare, ma che si chiude intorno alla terra estendendosi a grandissima distanza dalla parte notturna. Dalla parte del sole la magnetopausa dista circa 65 mila chilometri dalla terra, ma dall'altra parte la sua coda «a goccia» può raggiungere una distanza di un milione e mezzo di chilometri, o anche più. Nel 1966 la sonda sovietica "Luna Decima" che girò intorno al nostro satellite, rilevò un debole campo magnetico che circondava quel corpo celeste; tale campo avrebbe potuto anche essere la coda della magnetosfera terrestre che passava vicino alla luna.

La cattura di particelle cariche lungo le linee di forza magnetica era stata prevista nel 1957 da uno scienziato dilettante, Nicholas Christofilos (un greco nato in America), che si guadagnava da vivere facendo il rappresentante di una ditta americana costruttrice di ascensori. Egli aveva inviato i suoi calcoli agli scienziati impegnati in questo campo, ma nessuno di loro vi aveva prestato grande attenzione. (Nella scienza, come in altri campi, i professionisti hanno la tendenza a ignorare i dilettanti.) Fu soltanto quando gli scienziati «ufficiali» arrivarono indipendentemente agli stessi risultati di Christofilos che questi ottenne un riconoscimento e fu accolto con onore all'Università della California. La sua teoria sulla cattura delle particelle oggi ha preso il nome di "effetto Christofilos".

Nell'agosto e nel settembre del 1958, gli Stati Uniti si accinsero a verificare se tale effetto ha realmente luogo nello spazio, lanciando tre razzi che trasportavano delle bombe nucleari, e facendole esplodere a 480 chilometri di altezza, nell'esperimento chiamato "Progetto Argo". Il flusso di particelle cariche prodotte dalle esplosioni nucleari si dispose lungo le linee di forza, e ne rimase effettivamente catturato; la fascia prodotta durò per un tempo considerevole, ed "Explorer Quarto" la registrò centinaia di volte durante le sue orbite intorno alla terra. La nube di particelle

diede origine anche a deboli fenomeni aurorali, disturbando per un certo periodo il funzionamento dei radar.

Questo fu un preludio ad altri esperimenti destinati a esercitare un'influenza o addirittura ad alterare l'ambiente spaziale più prossimo alla terra; ma alcuni di questi esperimenti suscitarono l'opposizione e l'indignazione di certi settori della comunità scientifica. Una bomba nucleare fatta esplodere nello spazio il 9 luglio 1962 provocò nella magnetosfera notevoli alterazioni che mostrarono di persistere a lungo, secondo quanto era stato previsto da alcuni degli scienziati contrari all'esperimento, come Fred Hoyle.

L'Unione Sovietica nel 1962 effettuò degli analoghi test ad alta quota. Questi interventi che alterano la situazione naturale possono essere d'ostacolo alla nostra comprensione della magnetosfera; è improbabile che siffatti esperimenti vengano ripetuti a breve termine.

Vennero fatti anche dei tentativi di spargere uno strato di sottili aghi di rame in un'orbita intorno alla terra, per vedere se e in che misura riflettevano i segnali radio, allo scopo di stabilire un sistema sicuro di comunicazione sulle lunghe distanze. (La ionosfera, invece, viene spesso perturbata dalle tempeste magnetiche, con il rischio che le comunicazioni radio possono interrompersi in un momento cruciale.) Nonostante le proteste dei radioastronomi, che temevano che si interferisse con i segnali radio provenienti dallo spazio, il progetto (Progetto West Ford, da Westford, nel Massachussets, dove erano stati fatti gli studi preliminari) fu realizzato il 9 maggio del 1963. Venne messo in orbita un satellite che conteneva 400 milioni di aghi di rame, ciascuno di lunghezza inferiore ai due centimetri e più sottile di un capello umano - per un peso totale di 22 chilogrammi.

Gli aghi vennero espulsi, facendo in modo che si distribuissero lungo una fascia tutto intorno alla terra, e si verificò che essa rifletteva le radioonde, come era stato previsto. Tale fascia rimase in orbita per tre anni. Tuttavia, per un'utilizzazione pratica occorrerebbe una fascia di spessore molto maggiore, e c'è da dubitare che un simile progetto riuscirebbe a superare le proteste dei radioastronomi.

MAGNETOSFERE PLANETARIE.

Naturalmente gli scienziati erano curiosi di sapere se esistessero fasce di radiazione intorno a corpi celesti diversi dalla terra. Se la teoria di Elsasser è esatta, un corpo planetario deve soddisfare due requisiti per avere un'apprezzabile magnetosfera: deve possedere un nucleo liquido, elettricamente conduttore, in cui possano generarsi dei vortici; e deve avere un periodo di rotazione sufficientemente rapido da causare l'insorgenza di tali vortici. La luna, per esempio, ha una bassa densità e le sue dimensioni limitate non consentono al suo centro la presenza di altre temperature, così che quasi certamente non ha un nucleo metallico liquido. Ma anche se l'avesse, essa ruota troppo lentamente per provocare dei vortici; pertanto la luna, da entrambi i punti di vista, non dovrebbe avere un campo magnetico di qualche importanza. Purtuttavia, per logiche che possano essere simili argomentazioni astratte, è sempre meglio procedere a una misurazione diretta, cosa che può essere fatta con facilità da sonde appositamente equipaggiate.

In effetti, le prime due sonde lunari, "Lunik Primo" e "Lunik Secondo", lanciate dai sovietici rispettivamente il 2 gennaio 1959 e nel settembre dello stesso anno, non trovarono segni di fasce di radiazione intorno alla luna, e tale risultato è stato in seguito confermato in ogni altro accostamento alla luna.

Venere è senz'altro un caso più interessante; la sua massa e la sua densità sono di poco inferiori a quelle della terra e deve sicuramente avere, come questa, un nucleo metallico liquido. Tuttavia, la rotazione di Venere è molto lenta, anche più di quella della luna. La sonda "Mariner 2", lanciata verso Venere nel 1962, e tutte quelle successive hanno inviato dati concordi circa l'assenza di un campo magnetico significativo intorno a quel pianeta; se ve ne è uno (probabilmente prodotto

da effetti di conduzione nella ionosfera della sua densa atmosfera), la sua intensità deve essere inferiore a 1 su 20 mila di quella del campo magnetico terrestre.

Anche Mercurio ha una densità elevata e deve avere un nucleo metallico; ma, come Venere, ruota molto lentamente. "Mariner 10", che sfiorò Mercurio nel 1973 e nel 1974, rilevò la presenza di un debole campo magnetico, leggermente più intenso di quello di Venere, in assenza di un'atmosfera che ne giustificasse l'esistenza. Per debole che sia, il campo magnetico di Mercurio è troppo forte per essere dovuto alla sua lenta rotazione. Forse a causa delle sue dimensioni (considerevolmente inferiori a quelle di Venere e della terra), il nucleo metallico di Mercurio è sufficientemente freddo per essere ferromagnetico e possedere in modesta misura le proprietà di un magnete permanente; ma non siamo ancora in grado di dire se le cose stiano veramente così.

Marte ruota con l'opportuna velocità, ma è più piccolo e meno denso della terra. Probabilmente non ha un nucleo metallico di dimensioni ragguardevoli, ma anche un piccolo nucleo può produrre un qualche effetto, e sembra che Marte effettivamente abbia un debole campo magnetico, più intenso di quello di Venere, anche se molto meno di quello della terra.

Per Giove il discorso è del tutto diverso. La sua massa gigantesca e la sua rapida rotazione ne farebbero un candidato naturale per la presenza di un campo magnetico, se sapessimo qualcosa di certo sulle proprietà di conduzione del suo nucleo. Tuttavia, ancora nel 1955, quando non si sapeva nulla su questo punto e non erano ancora state costruite le sonde spaziali, due astronomi americani, Bernard Burke e Kenneth Franklin, rilevarono delle radioonde non termiche provenienti da Giove: esse cioè non erano dovute a soli effetti termici, ma dovevano avere qualche altra causa, forse un campo magnetico in cui erano rimaste catturate delle particelle ad alta energia. Fu questa appunto l'interpretazione data nel 1959 da Frank Donald Drake alle radioonde provenienti da Giove.

La teoria fu ampiamente confermata dalle prime sonde inviate verso Giove, "Pioneer 10" e "Pioneer 11", che individuarono senza difficoltà un campo magnetico, ancora più intenso di quanto non ci si fosse aspettato in considerazione delle grandi dimensioni del pianeta, e di dimensioni gigantesche in confronto al campo magnetico terrestre: la magnetosfera di Giove è grande circa 1200 volte quella della terra. Se fosse visibile, riempirebbe una zona del cielo, che, dalla terra, apparirebbe parecchie volte più grande del disco della luna piena.

L'intensità del campo magnetico di Giove, inoltre, è 19 mila volte quella del campo magnetico terrestre; se mai un veicolo spaziale con uomini a bordo volesse raggiungere il pianeta, il suo campo magnetico costituirebbe una barriera invalicabile e mortale, comprendente al proprio interno anche i satelliti galileiani.

Anche Saturno ha un intenso campo magnetico, di grandezza intermedia tra quelli di Giove e della terra. Ancora non possiamo dirlo in base all'osservazione diretta, ma sembra ragionevole supporre che anche Urano e Nettuno abbiano dei campi magnetici, che potrebbero essere più intensi di quello terrestre. In tutti i pianeti gassosi giganti la natura del nucleo conduttore liquido potrebbe essere o metallo liquido o idrogeno metallico liquido - ma quasi certamente quest'ultimo nel caso di Giove e Saturno.

METEORE E METEORITI.

Anche gli antichi greci sapevano che le stelle cadenti non erano vere stelle, perché la popolazione celeste restava invariata indipendentemente dal numero di quelle che cadevano. Aristotele riteneva che la caduta delle stelle, in quanto fenomeno temporaneo, dovesse verificarsi all'interno dell'atmosfera - e in questo aveva ragione. Pertanto a tali oggetti venne dato il nome di "meteore", che significa «cose nell'aria». Le meteore che raggiungono la superficie terrestre vengono chiamate "meteoriti".

Gli antichi assistettero anche a cadute di meteoriti e di alcuni poterono stabilire che erano blocchi di ferro. Si dice che Ipparco di Nicea abbia parlato di uno di tali eventi. Anche la Kaaba, la

sacra pietra nera della Mecca, è ritenuta un meteorite, ed è venerata proprio in virtù della sua origine celeste. L'"Iliade" menziona un pezzo di ferro grezzo che costituiva uno dei premi in palio ai giochi funebri in onore di Patroclo, e siccome si era nell'Età del Bronzo, doveva essere di origine meteorica, perché la metallurgia del ferro non era stata ancora sviluppata. È probabile, anzi, che il ferro meteorico fosse in uso già dal 3000 avanti Cristo.

Durante il diciottesimo secolo, in piena Età della Ragione, la scienza fece un passo indietro sulla questione dei meteoriti. Le storie di «pietre provenienti dal cielo» venivano derise dagli avversari delle superstizioni; alcuni contadini che si presentarono all'Académie Française recando campioni di meteoriti vennero messi alla porta con cortesia, ma anche con impazienza. Quando, nel 1807, due studiosi del Connecticut (uno dei quali era il giovane chimico Benjamin Silliman) riferirono di aver assistito a una caduta, il presidente Thomas Jefferson disse che avrebbe più facilmente creduto che due professori americani mentissero piuttosto che cadessero delle pietre dal cielo.

Jefferson, però, non era aggiornato, perché le voci di cadute di meteoriti in Francia avevano finalmente spinto il fisico Jean Baptiste Biot a indagare, nel 1803, su tali avvistamenti. La sua ricerca, condotta con rigore ed equilibrio, contribuì in misura notevole a convincere il mondo scientifico della possibilità di cadute di «pietre» dal cielo.

Poi, il 13 novembre 1833, gli Stati Uniti assistettero a una pioggia di meteore del tipo cui si dà il nome di Leonidi, perché sembrano irradiarsi da un punto nella costellazione del Leone. Per qualche ora il cielo si trasformò in uno spettacolo di fuochi d'artificio, più brillante di quanti se ne fossero mai visti prima e di quanti se ne siano visti dopo di allora. Per quanto se ne sa, non vi furono meteoriti caduti al suolo, ma lo spettacolo stimolò lo studio delle meteore, e gli astronomi vi rivolsero la propria attenzione per la prima volta in tutta serietà.

Proprio l'anno successivo il chimico svedese Jons Jakob Berzelius diede inizio a un programma di analisi chimica dei meteoriti, che finì per fornire agli astronomi valide informazioni sull'età generale del sistema solare e anche sulla costituzione chimica complessiva dell'universo.

Le meteore.

Annotando i periodi dell'anno in cui tali fenomeni erano più frequenti e le posizioni nel cielo da cui sembravano provenire, gli osservatori riuscirono a calcolare le orbite di vari sciami di meteore, e scoprirono anche che si verifica una pioggia di meteore quando l'orbita della terra interseca l'orbita di uno di tali sciami.

Gli sciami di meteore hanno orbite allungate, proprio come le comete, così che è ragionevole considerarle come frammenti di comete disintegrate. Le comete, in effetti, si possono disintegrare, lasciando dietro di sé polvere e pietrisco, a conferma delle ipotesi avanzate da Whipple sulla loro struttura. Alcune comete sono state viste effettivamente disintegrarsi.

Quando la polvere di una cometa penetra nell'atmosfera, può provocare effetti spettacolari, come è accaduto nel 1833. Una stella cadente brillante come Venere, quando entra nell'atmosfera, non è che un granellino del peso di un grammo; alcune meteore visibili hanno una massa pari a un decimillesimo di grammo!

Si può calcolare il numero totale delle meteore che colpiscono l'atmosfera terrestre e il risultato è incredibilmente alto: ogni giorno ve ne sono più di ventimila che pesano da un grammo in su, quasi duecento milioni di altre abbastanza grandi da provocare uno scintillio visibile a occhio nudo, e ancora molti miliardi di dimensioni inferiori.

Siamo a conoscenza di queste piccolissime "micrometeore" perché si è scoperto che l'aria contiene particelle di polvere di forma insolita, con alto contenuto di nichel, ben diverse dalla normale polvere terrestre. Un'altra prova della presenza di micrometeore in grandi quantità è la debole luminosità del cielo detta "luce zodiacale" (scoperta da G. D. Cassini verso il 1700) - così chiamata perché è più facilmente osservabile in vicinanza del piano dell'orbita terrestre, dove si

trovano le costellazioni dello Zodiaco. La luce zodiacale è molto debole, e non la si può scorgere nemmeno in una notte senza luna, a meno che le condizioni siano particolarmente favorevoli. È più intensa vicino all'orizzonte, dove il sole è appena tramontato o sta per sorgere; e dalla parte opposta del cielo si nota una luminosità secondaria, detta, con termine tedesco, "Gegenschein" (o antichiarore). La luce zodiacale differisce dalla luminescenza atmosferica diffusa: il suo spettro non contiene le righe dell'ossigeno atomico o del sodio atomico, ma è identico allo spettro della luce solare riflessa. L'agente riflettente è presumibilmente polvere concentrata nello spazio nel piano delle orbite dei pianeti - in breve, micrometeore. Il loro numero e la loro grandezza possono essere valutati in base all'intensità della luce zodiacale.

Di recente le micrometeore sono state conteggiate in modo più preciso ricorrendo a satelliti come l'"Explorer Sedicesimo", lanciato nel dicembre del 1962, e "Pegasus Primo", lanciato il 16 febbraio del 1965. A tale scopo alcuni satelliti vengono ricoperti di materiale sensibile, che segnala ogni impatto meteorico traducendolo in una variazione della resistenza elettrica. Altri satelliti registrano gli urti per mezzo di un microfono molto sensibile che, collocato a ridosso dell'involucro esterno, percepisce i colpi. In base ai conteggi effettuati dai satelliti è risultato che ogni giorno entrano nella nostra atmosfera 3000 tonnellate di materiale meteorico, i cinque sesti del quale sono fatti di micrometeore troppo piccole per essere avvistate come stelle cadenti. Queste micrometeore formano una sottile nube di polvere intorno alla terra, che forse si estende, con densità decrescente, per 160 mila chilometri circa, prima di rarefarsi fino a raggiungere la densità normale nello spazio interplanetario.

La sonda diretta verso Venere, "Mariner 2", ha mostrato che la concentrazione della polvere nello spazio interplanetario è solo 1 su 10000 della concentrazione presente in vicinanza della terra - la quale appare quindi come il centro di una palla di polvere. Fred Whipple ha proposto che all'origine della nube possa esserci stata la luna: la polvere si sarebbe sollevata dalla superficie lunare, in seguito al bombardamento di meteoriti cui questa è stata sottoposta. Venere, che non ha lune, non ha nemmeno il guscio di polvere.

Il geofisico Hans Petterson, che si è particolarmente interessato di questa polvere meteorica, nel 1957 prelevò alcuni campioni di aria sulla vetta di una montagna nelle Hawaii, cioè nel luogo più distante possibile dalle zone industriali, che producono polvere; in base ai dati raccolti, Petterson giunse alla conclusione che ogni anno cadono sulla terra 5 milioni di tonnellate di polvere meteorica. (Un'analoga misurazione effettuata nel 1964 da James M. Rosen, con l'ausilio di strumenti portati ad alta quota da palloni, stabilì la cifra di 4 milioni di tonnellate; altri studiosi, invece, vorrebbero ridurre la stima a 100 mila tonnellate all'anno.) Hans Petterson, nella speranza di veder chiaro a proposito della caduta di polvere nel passato, ha analizzato carote di materiale estratto dal fondo dell'oceano, cercandovi polvere avente un alto contenuto di nichel; ha trovato che, nel complesso, ce ne era di più nei sedimenti degli strati superiori che in quelli più antichi degli strati inferiori. Ciò farebbe pensare - ma è ancora presto per concludere - che nei tempi più recenti il ritmo del bombardamento meteorico sia aumentato. Questa polvere meteorica potrebbe avere un'importanza immediata per noi tutti, perché, secondo la teoria avanzata nel 1953 dal fisico australiano Edward George Bowen, sarebbe essa a fornire i nuclei di condensazione per le gocce di pioggia. Se così fosse, il regime delle piogge sulla terra rifletterebbe l'aumento o la diminuzione dell'intensità del bombardamento dei micrometeoriti.

I meteoriti.

Di quando in quando pezzi di materia un po' più grossi che minuscoli frammenti - e a volte anche decisamente grandi - penetrano nell'atmosfera. Essi possono essere abbastanza grandi da resistere al calore prodotto dall'attrito dell'aria mentre attraversano l'atmosfera con velocità comprese fra 13 e 72 chilometri al secondo; e in tal caso possono riuscire a raggiungere il suolo. Si

tratta allora, come ho già detto, di meteoriti, che vengono considerati piccoli asteroidi - più precisamente, «Earth grazers» che si sono avvicinati un po' troppo alla terra, venendone catturati.

La maggior parte dei meteoriti che sono stati trovati sul suolo (in tutto se ne conoscono circa 1700, dei quali 35 pesano più di una tonnellata ciascuno) erano ferrosi; si pensava quindi che i meteoriti ferrosi fossero più numerosi di quelli petrosi. Ma poi questa supposizione si dimostrò sbagliata: infatti un blocco di ferro mezzo sepolto in un campo pieno di sassi si nota molto più facilmente di un pezzo di pietra in mezzo ad altre pietre. Tuttavia, anche un meteorite petroso all'analisi rivela differenze caratteristiche rispetto alle pietre della terra.

Quando gli astronomi conteggiarono i meteoriti rinvenuti che erano stati effettivamente visti cadere, scoprirono che quelli petrosi erano più numerosi di quelli ferrosi, nel rapporto di 9 a 1. (Per un certo periodo la maggior parte dei meteoriti petrosi fu scoperta nel Kansas, cosa che può apparire strana finché non si comprende che sul suolo sedimentario, privo di sassi, del Kansas una pietra salta all'occhio altrettanto bene di un pezzo di ferro su un altro terreno.)

Si ritiene che i due tipi di meteoriti abbiano avuto la seguente origine: quando il sistema solare era giovane, gli asteroidi erano forse, in media, più grandi di oggi. Una volta formatisi, mentre le perturbazioni gravitazionali provocate da Giove ne impedivano l'ulteriore aggregazione, alcuni di essi entrarono in collisione fra loro andando in frantumi. Può darsi, tuttavia, che, prima di tali collisioni, la loro temperatura fosse aumentata al punto di provocare una certa separazione dei loro componenti: il ferro sarebbe affondato al centro, mentre la pietra sarebbe stata sospinta negli strati esterni. Quando in seguito questi asteroidi si frantumarono, diedero origine sia a frammenti di ferro che a frammenti di pietra, appunto i due tipi di meteoriti che cadono sulla terra.

Esistono anche meteoriti di un terzo tipo, rarissimo: le "condriti carbonacee", che sono interessanti perché contengono tracce di composti organici.

I meteoriti sono raramente fonte di danni: nonostante il fatto che ogni anno circa 500 meteoriti di dimensioni rispettabili colpiscano il nostro pianeta (ma, purtroppo, solo una ventina di essi vengono rinvenuti), la terra è grande, e solo zone relativamente limitate sono densamente popolate. Per quanto se ne sa, nessun essere umano è mai stato ucciso da un meteorite: si ha solo notizia di una donna, nell'Alabama, che sarebbe rimasta contusa da un colpo ricevuto di striscio il 30 novembre del 1955. Nel 1982, poi, un meteorite attraversò come un lampo una casa a Wethersfield, nel Connecticut, senza tuttavia arrecare danni agli occupanti. Cosa strana, Wethersfield era stata colpita anche undici anni prima, sempre senza riportare danni.

Eppure i meteoriti sono in grado di produrre effetti disastrosi. Nel 1908, per esempio, l'impatto di un corpo nella Siberia centrale scavò dei crateri del diametro di 45 metri e abbatté tutt'intorno gli alberi per un raggio di 32 chilometri. Per fortuna, il meteorite cadde in un luogo disabitato e non procurò alcun danno alle persone, limitandosi a distruggere un branco di cervi. A causa della rotazione terrestre, se il meteorite fosse caduto da quella stessa parte del cielo solo cinque ore più tardi, avrebbe potuto colpire Pietroburgo, l'odierna Leningrado, allora capitale della Russia. In tal caso la città sarebbe stata spazzata via come da una bomba all'idrogeno. Si è stimato che il peso totale del meteorite si aggirasse sulle 40 mila tonnellate.

L'"evento della Tunguska" (come finì per essere chiamato) è rimasto piuttosto misterioso. L'inaccessibilità della zona, la confusione causata prima dalla guerra e poi dalla rivoluzione impedirono per molti anni di far ricerche in quella zona; quando finalmente fu possibile farle, non si trovò traccia di materiale meteorico.

Recentemente uno scrittore sovietico di fantascienza, narrando una storia ambientata in quel luogo, parlò della presenza di radioattività sul posto - e la sua invenzione venne presa sul serio da gente con un debole per il sensazionale. Ne derivò un proliferare di teorie poco fondate - da quella di un impatto di un mini-buco nero a quella di un'esplosione nucleare di origine extraterrestre. La spiegazione razionale più verosimile è che si sia trattato di una meteora formata di ghiacci, probabilmente una cometa molto piccola, o un frammento di una più grande (forse la cometa di

Encke). Essa sarebbe esplosa nell'aria prima dell'impatto, e pur provocando danni immensi, non avrebbe depositato materiale meteorico petroso o metallico.

In seguito, l'impatto più grave di cui si ha notizia fu quello avvenuto vicino a Vladivostok (ancora in Siberia), nel 1947.

Sussistono tracce di impatti ancora più violenti avvenuti in tempi preistorici. Nella contea di Coconino, in Arizona, vi è un cratere rotondo del diametro di circa 1300 metri, profondo quasi 200 metri, circondato da un bordo di terra alto fino a una cinquantina di metri.

Sembra un cratere lunare in miniatura. Si credette per lungo tempo che fosse un vulcano estinto, finché un ingegnere minerario, Daniel Moreau Barringer, affermò insistentemente che si trattava dell'effetto di una collisione meteorica; oggi il buco porta il nome di cratere di Barringer. Esso è circondato tutt'intorno da blocchi di ferro meteorico - migliaia (forse milioni) di tonnellate complessivamente.

Anche se fino a oggi ne è stata recuperata solo una piccola parte, il ferro meteorico estratto dalla zona è molto di più di quello recuperato in tutto il resto del mondo. L'origine meteorica del cratere è stata confermata anche dalla scoperta, avvenuta nel 1960, di forme di silice che possono essere state prodotte solo dalle enormi pressioni e temperature che per breve tempo si verificano durante l'impatto di un meteorite.

Il cratere di Barringer, formatosi nel deserto forse 25 mila anni orsono per l'impatto di un meteorite ferroso del diametro di 45 metri circa, si è conservato abbastanza bene. In quasi tutte le parti del mondo un cratere del genere sarebbe stato cancellato dalle acque e dalla vegetazione. L'osservazione aerea, per esempio, ha consentito di avvistare formazioni circolari che erano passate inosservate in precedenza, in parte riempite dall'acqua e in parte ricoperte dalla vegetazione, che sono quasi certamente di origine meteorica. Ne sono state scoperte parecchie in Canada, fra le quali il cratere Brent nell'Ontario centrale e il cratere Chubb nel Quebec settentrionale, ciascuno dei quali ha un diametro di tre chilometri e più. Vi è poi il cratere Ashanti nel Ghana, che ha un diametro di quasi dieci chilometri. Tutti questi crateri hanno probabilmente più di un milione di anni. Si ha notizia di una settantina di questi "crateri-fossili", i cui diametri raggiungono i 135 chilometri.

I crateri della luna vanno da piccole buche a giganti del diametro di 240 chilometri. La luna - priva com'è di acqua, aria e vita - è un luogo quasi perfetto per la conservazione dei crateri, perché questi sono sottoposti soltanto agli effetti disgreganti, molto lenti, dei cambiamenti di temperatura prodotti dall'alternarsi del giorno e della notte lunari, ogni due settimane. Forse anche la terra sarebbe butterata come la luna, se non fosse per l'azione cicatrizzante del vento, dell'acqua e degli esseri viventi.

In un primo tempo si era pensato che i crateri lunari avessero un'origine vulcanica, ma la loro struttura non assomiglia affatto a quella dei crateri vulcanici terrestri. A partire dal 1890 cominciò a farsi strada la convinzione che i crateri fossero stati prodotti da impatti di meteoriti, e tale idea finì per essere accettata universalmente.

I grandi «mari» della luna, che sono vaste estensioni quasi circolari relativamente prive di crateri, sarebbero stati prodotti, secondo tale teoria, dall'impatto di meteore particolarmente grandi. Questa tesi fu rafforzata, nel 1968, da quanto avveniva ai satelliti messi in orbita intorno alla luna, le cui traiettorie subivano delle deviazioni impreviste. Studiando la natura di tali deviazioni si giunse alla conclusione inevitabile che alcune zone della superficie lunare avevano una densità superiore alla media, e producevano quindi un piccolo aumento dell'attrazione gravitazionale, che veniva avvertita dal satellite allorché le sorvolava. Queste zone di densità superiore alla media, che sembravano coincidere con i mari, furono chiamate "mascon" (contrazione dell'espressione inglese che significa «concentrazione della massa»). La conclusione più ovvia era che le meteore ferrose di notevoli dimensioni che avevano dato origine ai mari fossero ancora presenti, sepolte sotto la superficie, e avessero una densità considerevolmente maggiore di quella del materiale roccioso che costituisce, in genere, la crosta lunare. Nel giro di un anno dalla loro scoperta, almeno una dozzina di mascon erano stati individuati.

L'idea che la luna sia un «mondo morto», in cui non si possa manifestare alcuna attività vulcanica, è d'altra parte esagerata. Il 3 novembre 1958 l'astronomo russo N. A. Kozyrev osservò una macchia rossiccia nel cratere Alfonso (William Herschel aveva riferito di aver visto delle macchie rossastre sulla luna fin dal 1780). Gli studi spettroscopici di Kozyrev sembravano dimostrare che vi era stata un'emissione di polvere e gas. Da allora sono state avvistate altre macchie transitorie di color rossiccio, e sembra certo che sulla luna avvenga occasionalmente qualche attività vulcanica. Durante l'eclissi lunare totale del dicembre 1964 si è scoperto che ben 300 crateri erano più caldi del territorio circostante anche se, naturalmente, non abbastanza caldi da emettere luce.

I mondi privi di atmosfera, come Mercurio e i satelliti di Marte, Giove e Saturno, sono, in genere, fittamente cosparsi di crateri che ricordano il bombardamento avvenuto 4 miliardi di anni orsono, o più, quando tali mondi si formarono per aggregazione di oggetti planetesimali. Da allora, non è successo niente che abbia cancellato quelle tracce.

Venere è povera di crateri, forse a causa degli effetti di erosione della sua densa atmosfera. Un emisfero di Marte è povero di crateri, forse perché l'azione vulcanica ha provocato la formazione di una nuova crosta. Su Io non ci sono praticamente crateri, a causa dell'accumulo di lava emessa dai suoi vulcani attivi. Europa non ha crateri perché, quando l'impatto di una meteora infrange i ghiacci che la ricoprono, penetrando nel liquido sottostante, quest'ultimo risale in superficie e si congela in poco tempo, «rimarginando» la «ferita».

I meteoriti sono gli unici campioni di materia extraterrestre che noi possiamo esaminare, e pertanto suscitano un interesse vivissimo non solo fra gli astronomi, i geologi, i chimici e gli esperti di metallurgia, ma anche fra i cosmologi, che studiano le origini dell'universo e del sistema solare. In varie parti della terra sono stati trovati strani oggetti vetrosi di origine presumibilmente meteorica: il primo ritrovamento risale al 1787, e avvenne in quel che oggi è la parte occidentale della Cecoslovacchia. Nel 1864 furono rinvenuti altri esemplari in Australia. Essi sono stati battezzati "tectiti" (dalla radice greca, che significa «fuso»), perché si pensa che si siano fusi durante il loro passaggio nell'atmosfera.

Nel 1936 l'astronomo americano Harvey Harlow Ninninger propose l'ipotesi che le tectiti fossero dei residui di materiale proiettato lontano dalla luna in seguito all'impatto sulla sua superficie di grandi meteore; successivamente tale materiale sarebbe stato catturato dal campo gravitazionale terrestre. Si è trovato un giacimento particolarmente esteso di tectiti sparpagliate fra l'Australia e il Sudest asiatico (molte sono state estratte dal fondo dell'Oceano Indiano). Sembra che queste siano le tectiti più giovani, risalenti a soli 700 mila anni fa. È verosimile che siano state prodotte dall'impatto del grande meteorite che ha causato la formazione del cratere Tycho sulla luna (il più giovane degli spettacolosi crateri lunari). Il fatto che tale impatto, a quanto sembra, avrebbe coinciso con la più recente inversione del campo magnetico terrestre ha suscitato alcune riflessioni teoriche sull'eventualità che la serie, sorprendentemente irregolare, di inversioni del campo magnetico terrestre possa indicare altre catastrofi di questo genere verificatesi nel sistema terra-luna.

Un'altra categoria insolita di meteoriti è quella degli oggetti reperibili nell'Antartide. Anzitutto qualsiasi meteorite, sia metallico sia petroso, quando giace su quella vasta calotta di ghiacci salta inevitabilmente agli occhi. Praticamente ovunque nell'Antartide, qualsiasi oggetto solido che non sia ghiaccio o qualcosa di provenienza umana, è necessariamente un meteorite; inoltre, una volta raggiunta la terra, un meteorite in quel continente resta sicuramente intatto (e tale è restato almeno durante gli ultimi venti milioni di anni), e rischia solo di venir sepolto dalla neve o di capitare a tiro di qualche pinguino imperatore.

Non si può dire che nell'Antartide ci sia mai stata una gran folla di esseri umani; inoltre, solo una piccola parte del continente è stata esaminata a fondo; pertanto, fino al 1969, erano stati trovati solo quattro meteoriti, e tutti per caso. Nel 1969 un gruppo di geologi giapponesi si imbatté in nove meteoriti situati a breve distanza l'uno dall'altro. Il ritrovamento suscitò l'interesse di tutti gli

scienziati, e altri meteoriti furono rinvenuti. Nel 1983 il numero dei frammenti meteoritici rinvenuti nel continente ghiacciato era salito a oltre 5000 - assai di più che in tutto il resto del mondo. (Questo non significa che l'Antartide abbia ragioni speciali per esserne colpita, ma solo che lì è assai più facile individuarli.)

Alcuni dei meteoriti antartici sono veramente strani. Nel gennaio 1982 è stato scoperto un frammento di meteorite di color bruno-verdastro, che, all'analisi, ha mostrato di avere una composizione notevolmente simile a quella di alcune pietre lunari portate sulla terra dagli astronauti. Non è facile trovare una spiegazione di come abbia fatto un pezzo di materia lunare a raggiungere la terra dopo esser stato scagliato nello spazio, ma certo questa è una possibilità.

Inoltre alcuni frammenti di meteoriti dell'Antartide, riscaldati, emettono dei gas, la cui composizione è risultata molto simile a quella dell'atmosfera marziana; fatto ancora più singolare, poi, è che questi meteoriti, a quanto sembra, hanno soltanto 1300 milioni di anni, anziché 4500 milioni come quelli più comuni. Può darsi che 1300 milioni di anni fa i vulcani marziani attraversassero un periodo d'intensa attività: alcuni meteoriti potrebbero essere pezzi di lava marziana, giunta non si sa come fino a noi.

Il calcolo dell'età dei meteoriti (con metodi che verranno descritti nel capitolo settimo) è, fra l'altro, la base di un importante metodo per determinare l'età della terra e del sistema solare.

L'ATMOSFERA: COME SI È FORMATA E COME È STATA TRATTENUTA DALLA TERRA.

Prima di chiederci come si sia formata l'atmosfera della terra, sarà forse meglio discutere come abbia fatto l'aria a restare attaccata alla terra per tutti gli eoni in cui si è protratto il «balletto» del nostro pianeta nello spazio. Per rispondere dobbiamo chiamare in causa il concetto di "velocità di fuga".

LA VELOCITÀ DI FUGA.

Quando lanciamo un oggetto verso l'alto dalla superficie terrestre, l'attrazione gravitazionale lo rallenta gradualmente finché, dopo un istantaneo arresto, esso inizia a ricadere verso la terra. Se la forza di gravità restasse uguale a tutte le altitudini, la quota raggiunta dall'oggetto sarebbe proporzionale al quadrato della sua velocità ascendente iniziale; un oggetto lanciato alla velocità di 2 chilometri all'ora dovrebbe raggiungere un'altezza quadrupla di un altro lanciato alla velocità di 1 chilometro all'ora (l'energia cresce cioè con il quadrato della velocità).

Ma la forza di gravità non si mantiene costante: diminuisce lentamente con l'aumentare dell'altezza (per l'esattezza, diminuisce in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal centro della terra). Supponiamo di lanciare un oggetto verso l'alto con la velocità di un chilometro al secondo; esso raggiungerà un'altezza di circa 50 chilometri prima di invertire la sua marcia e ricadere (se ignoriamo la resistenza dell'aria); se avessimo lanciato lo stesso oggetto verso l'alto con la velocità di 2 chilometri al secondo, esso avrebbe raggiunto un'altezza più che quadrupla. All'altezza di 50 chilometri, l'attrazione gravitazionale terrestre è infatti molto inferiore a quella presente al livello del suolo, quindi da quell'altezza in poi il proiettile sarebbe soggetto a un'attrazione gravitazionale minore.

Pertanto esso salirebbe a più di 200 chilometri (per l'esattezza a 211 chilometri). Data una velocità ascendente iniziale di 10 chilometri al secondo, un oggetto raggiunge 25400 chilometri di altezza. A quel punto la forza di gravità non è più di 1 su 25 di quella a livello del suolo. Se aumentiamo la velocità iniziale dell'oggetto di cinquecento metri al secondo (cioè lo lanciamo alla velocità di 10,5 chilometri al secondo) esso raggiunge 47400 chilometri di altezza.

I calcoli hanno mostrato che un oggetto lanciato verso l'alto con una velocità iniziale di 11,2 chilometri al secondo non ricade più sulla terra. È vero che la gravità terrestre farà diminuire gradualmente la sua velocità, ma questo effetto diventerà sempre più piccolo, e quindi l'oggetto non

raggiungerà mai una velocità zero (cioè non si arresterà mai) rispetto alla terra (e con questo abbiamo sistemato anche il luogo comune secondo cui «tutto ciò che sale finisce per scendere»).

La velocità di 11,2 chilometri al secondo è dunque la velocità di fuga della terra. Si può calcolare la velocità di fuga di qualsiasi altro corpo astronomico, in funzione della sua massa e delle sue dimensioni.

La velocità di fuga della luna è di soli 2,4 chilometri al secondo; quella di Marte, di 5,1, quella di Saturno di 37; quella di Giove, il pianeta di massa maggiore nel nostro sistema solare, è di 61 chilometri al secondo.

Tutto ciò ha un rapporto diretto con la capacità della terra di trattenere la sua atmosfera. Gli atomi e le molecole dell'aria si muovono incessantemente in tutte le direzioni, come se fossero minuscoli missili. Le loro velocità individuali variano moltissimo: noi siamo in grado di parlarne solo da un punto di vista statistico, per esempio dicendo qual è la frazione di molecole la cui velocità supera un dato valore, o qual è la velocità media delle molecole in determinate condizioni. La formula per esprimere questi valori fu elaborata per la prima volta nel 1860 da James Clerk Maxwell e dal fisico austriaco Ludwig Boltzmann, e viene chiamata "legge di Maxwell-Boltzmann".

La velocità media delle molecole di ossigeno dell'aria, a temperatura ambiente, è di circa 500 metri al secondo. La molecola dell'idrogeno, che pesa un sedicesimo di quella dell'ossigeno, si muove con una velocità media quadrupla (circa 2000 metri al secondo), perché, secondo la legge di Maxwell-Boltzmann, la velocità di una data particella a una data temperatura è inversamente proporzionale alla radice quadrata del suo peso molecolare.

È importante ricordare che stiamo parlando di velocità medie: una metà delle molecole ha infatti una velocità superiore alla media, una certa percentuale ha una velocità che supera il doppio della velocità media, una percentuale ancora minore supera il triplo della velocità media, e così via. Una minima percentuale delle molecole di ossigeno e di idrogeno dell'atmosfera ha una velocità superiore alla velocità di fuga, cioè a 11,2 chilometri al secondo.

Dagli strati inferiori dell'atmosfera queste particelle più veloci non riescono a fuggire, perché vengono rallentate dagli urti con le altre particelle, più lente di loro. Ma negli strati superiori hanno molta più probabilità di riuscire a fuggire: in primo luogo, lassù la radiazione solare, non incontrando ostacoli, ne eccita una porzione maggiore, impartendo loro elevate energie e alte velocità; in secondo luogo, le collisioni sono molto meno probabili in quell'aria rarefatta. Mentre una molecola vicina alla superficie terrestre viaggia solo per un decimillesimo di millimetro (in media) prima di avere una collisione con una sua vicina, all'altezza di 100 chilometri il suo cammino libero medio è di 10 centimetri e alla quota di 225 chilometri supera i mille metri. A quest'ultima altezza il numero medio di collisioni subite da un atomo o da una molecola è solo di una al secondo, contro i 5 miliardi al secondo al livello del mare.

Pertanto, una particella veloce all'altezza di 160 chilometri e oltre ha buone probabilità di sfuggire alla terra; se per caso si sposta verso l'alto, passa in regioni di densità ancora minore, dove la probabilità di subire collisioni sarà ancora più piccola, così che, alla fine, potrà prendere il volo per gli spazi interplanetari, per non far ritorno mai più.

In altri termini, l'atmosfera terrestre «perde». La perdita, però, riguarda prevalentemente le molecole più leggere. L'ossigeno e l'azoto sono relativamente pesanti, così che solo pochissime delle loro molecole riescono a raggiungere la velocità di fuga; quindi, da quando ossigeno e azoto si sono formati, la terra ha perso una quantità minima dei due gas. Invece, l'idrogeno e l'elio raggiungono facilmente la velocità di fuga; di conseguenza oggi l'atmosfera terrestre non contiene più quantità significative di questi ultimi due gas.

I pianeti dotati di massa maggiore, come Giove e Saturno, possono trattenere anche l'idrogeno e l'elio; pertanto essi hanno atmosfere di grande spessore, composte soprattutto di tali elementi (i quali, dopo tutto, sono le sostanze più comuni nell'universo). L'idrogeno, presente in grandi quantità, reagisce con gli altri elementi, e quindi il carbonio, l'azoto e l'ossigeno sono

presenti solo sotto forma di composti contenenti l'idrogeno: rispettivamente metano (CH_4), ammoniaca (NH_3) e acqua (H_2O). L'ammoniaca e il metano, benché presenti nell'atmosfera di Giove solo come impurità in concentrazioni relativamente modeste, sono stati osservati (per la prima volta nel 1931, dall'astronomo tedesco-americano Rupert Wildt) perché producono bande di assorbimento spettrali osservabili, a differenza dell'elio e dell'idrogeno che non ne producono. La presenza di questi ultimi due elementi è stata accertata con metodi indiretti nel 1952, e naturalmente confermata in seguito, dal 1973 in poi, dalle sonde passate vicino a Giove.

All'opposto, un pianeta di piccole dimensioni, come Marte, è scarsamente in grado di trattenere perfino le molecole relativamente pesanti, e la sua densità atmosferica è solo un centesimo di quella terrestre. La luna, poi, con la sua velocità di fuga ancora minore, non può trattenere alcun tipo di atmosfera, ed è quindi priva di aria.

La temperatura è un fattore altrettanto importante della gravità. Secondo l'equazione di Maxwell-Boltzmann, la velocità media delle particelle è proporzionale alla radice quadrata della temperatura assoluta. Se la terra avesse la temperatura della superficie del sole, tutti gli atomi e le molecole della sua atmosfera verrebbero accelerati fra quattro e cinque volte, ed essa non riuscirebbe a trattenere l'ossigeno e l'azoto più di quanto oggi succeda con l'elio e l'idrogeno.

Così, Mercurio, pur avendo una gravità alla superficie 2,2 volte maggiore di quella della luna, a causa della sua temperatura considerevolmente più elevata di quella del nostro satellite, non riesce a trattenere meglio la sua atmosfera ed è anch'esso privo di aria.

La gravità sulla superficie di Marte è solo di poco superiore a quella di Mercurio; ma, essendo Marte considerevolmente più freddo di Mercurio (e anche della terra e della luna), esso riesce ad avere una tenue atmosfera, in virtù più della sua bassa temperatura che della sua gravità alla superficie, non troppo elevata. I satelliti di Giove sono ancora più freddi di Marte, ma hanno anche una gravità superficiale dell'ordine di grandezza di quella della luna; pertanto non trattengono un'atmosfera. Titano, il grande satellite di Saturno, è invece tanto freddo da riuscire a trattenere una spessa atmosfera di azoto. E forse lo stesso vale per Tritone, il grande satellite di Nettuno.

L'ATMOSFERA ORIGINARIA.

Il fatto che la terra possieda un'atmosfera è un serio argomento contro la teoria che essa e gli altri pianeti del sistema solare abbiano avuto origine da un evento catastrofico, come una quasi-collisione tra il sole e un'altra stella; tale fatto depone piuttosto a favore della teoria della nube di polvere e dei planetesimali.

Quando polvere e gas della nube si condensarono dando origine ai planetesimali, e questi, a loro volta, si aggregavano formando un corpo planetario, può darsi che parte del gas sia rimasta imprigionata entro una massa porosa, come accade all'aria in un cumulo di neve; in seguito, la contrazione della massa per effetto della gravità avrebbe «spremuto» i gas, portandoli in superficie. Un dato gas sarebbe stato trattenuto o meno dalla terra anche a seconda della sua reattività chimica. L'elio e il neon, pur essendo stati sicuramente tra i gas più comuni nella nube originaria, sono così inerti dal punto di vista chimico da non formare alcun composto, e sarebbero quindi sfuggiti sotto forma di gas in breve tempo. È questa la ragione per cui le concentrazioni di elio e di neon sulla terra non sono che frazioni insignificanti delle rispettive concentrazioni nell'universo in generale. Per esempio, si è calcolato che la terra abbia trattenuto soltanto un atomo di neon ogni 50 miliardi presenti nella nube originaria. Quanto all'elio originario, la nostra atmosfera ne ha conservato ancora meno, anzi forse non ne ha conservato affatto. Se è vero infatti che oggi la nostra atmosfera contiene un po' di elio, è anche vero che esso potrebbe essere stato prodotto dalla disintegrazione di elementi radioattivi o essere sfuggito da cavità nel sottosuolo in cui era rimasto intrappolato. L'idrogeno, invece, anche se più leggero dell'elio o del neon, è stato trattenuto più efficacemente, perché si è combinato con altre sostanze, soprattutto con l'ossigeno, formando acqua. Si stima che la terra conservi ancora un atomo di idrogeno ogni 5 milioni di quelli presenti nella nube originaria.

Il caso dell'azoto e dell'ossigeno illustra ancora meglio l'importanza della reattività chimica: nonostante il fatto che la massa delle molecole di azoto non sia molto diversa da quella delle molecole di ossigeno, la terra ha trattenuto 1 atomo di ossigeno su 6 originari, essendo l'ossigeno altamente reattivo, mentre ha trattenuto 1 atomo di azoto su 800 mila, essendo l'azoto elemento inerte.

Quando parliamo dei gas presenti nell'atmosfera, dobbiamo prendere in considerazione anche il vapor acqueo; e qui ci imbattiamo nell'interessante problema dell'origine degli oceani. Nelle prime fasi della storia della terra, per quanto allora il nostro pianeta fosse solo moderatamente caldo, tutta l'acqua doveva trovarsi sotto forma di vapore. Alcuni geologi ritengono che in seguito l'acqua si sia concentrata nell'atmosfera formando una densa nube di vapore, e che, dopo il raffreddamento della terra, si sia riversata a torrenti su quest'ultima, formando gli oceani. Altri geologi, invece, sostengono che gli oceani si sono formati soprattutto con l'acqua che filtrava dall'interno della terra alla superficie. I vulcani mostrano che esiste ancora una gran quantità di acqua nella crosta terrestre, perché i gas da essi liberati sono in prevalenza vapor d'acqua. Se così stanno le cose, gli oceani sono forse ancora in fase di accrescimento, anche se lento.

Ma l'atmosfera terrestre è stata sempre così com'è oggi, fin dalla sua formazione? Ciò appare poco probabile. In primo luogo l'ossigeno molecolare, che costituisce un quinto del volume dell'atmosfera, è una sostanza così attiva che è estremamente improbabile che esista in forma libera, a meno che venga prodotto in continuazione; in secondo luogo, nessun altro pianeta ha un'atmosfera che somigli anche lontanamente alla nostra, così che si è fortemente tentati di concludere che l'atmosfera terrestre sia l'effetto di eventi unici (come, per esempio, la presenza della vita, che manca sugli altri pianeti).

Harold Urey ha sostenuto, con dovizia di argomenti, la tesi che l'atmosfera originaria fosse composta di ammoniaca e metano. Gli elementi più diffusi nell'universo sono idrogeno, elio, carbonio, azoto e ossigeno, con l'idrogeno di gran lunga preponderante. In tali condizioni, il carbonio avrebbe avuto un'alta probabilità di combinarsi con l'idrogeno, formando metano (CH_4), l'azoto avrebbe formato ammoniaca (NH_3) e l'ossigeno acqua (H_2O). L'elio e l'idrogeno in eccesso naturalmente sarebbero sfuggiti dall'atmosfera; l'acqua avrebbe formato gli oceani, mentre il metano e l'ammoniaca, gas relativamente pesanti, sarebbero stati trattenuti dalla gravità terrestre, venendo così a costituire la porzione preponderante dell'atmosfera.

Ammesso che tutti i pianeti dotati di una gravità sufficiente a trattenere un'atmosfera abbiano avuto all'inizio un'atmosfera di questo tipo, non tutti però l'avrebbero conservata senza mutamenti. Sarebbe intervenuta a modificare le cose la radiazione solare ultravioletta: i mutamenti sarebbero stati minimi per i pianeti esterni, i quali, innanzitutto, ricevono relativamente poca radiazione data la loro distanza dal sole, e, in secondo luogo, possiedono atmosfere molto spesse, capaci di assorbire considerevoli quantità di radiazione senza subire modificazioni sostanziali; pertanto i pianeti esterni avrebbero conservato fino ai nostri tempi le loro atmosfere di idrogeno, elio, ammoniaca e metano.

Ben diversamente sarebbero andate le cose per i cinque mondi interni, Marte, la terra, la luna, Venere e Mercurio. Di essi, la luna e Mercurio sono troppo piccoli e troppo caldi per trattenere una vera e propria atmosfera. Restano Marte, la terra e Venere, con tenui atmosfere formate prevalentemente, all'inizio, di ammoniaca, metano e acqua. Cosa sarebbe accaduto allora?

La radiazione ultravioletta, colpendo le molecole di acqua negli strati superiori dell'atmosfera primordiale della terra, ne avrebbe provocato la dissociazione in idrogeno e ossigeno ("fotodissociazione"). L'idrogeno sarebbe sfuggito dall'atmosfera, mentre l'ossigeno sarebbe rimasto. Essendo però altamente reattive, le sue molecole si sarebbero combinate praticamente con tutti i tipi di molecole con cui fossero entrate in contatto: avrebbero reagito con il metano (CH_4), formando anidride carbonica (CO_2) e acqua (H_2O); con l'ammoniaca (NH_3), formando azoto (N_2) più acqua (H_2O). Molto lentamente, ma con un processo continuo, la composizione dell'atmosfera si sarebbe convertita da metano e ammoniaca in azoto e anidride carbonica. L'azoto avrebbe

manifestato la tendenza a reagire lentamente con i minerali della crosta terrestre formando dei nitrati, e l'anidride carbonica sarebbe rimasta la componente principale dell'atmosfera.

A questo punto c'è da attendersi che l'acqua continui a subire la fotodissociazione e l'ossigeno ad accumularsi nell'atmosfera, mentre l'idrogeno sfugge nello spazio esterno? E se l'ossigeno che seguita ad accumularsi non trova niente con cui reagire (non potendo più reagire con l'anidride carbonica), non c'è forse da attendersi che all'anidride carbonica presente nell'atmosfera si aggiunga una certa percentuale di ossigeno molecolare (il che spiegherebbe la presenza di ossigeno nell'atmosfera terrestre)? La risposta è un secco no, le cose non possono essere andate così.

Quando l'anidride carbonica diventa la componente dominante dell'atmosfera, la radiazione ultravioletta non provoca più cambiamenti tramite la dissociazione delle molecole di acqua. Non appena comincia ad accumularsi ossigeno libero, nell'atmosfera superiore si forma un sottile strato di ozono, che assorbe l'ultravioletto, impedendogli di raggiungere gli strati inferiori dell'atmosfera e bloccando la fotodissociazione. Un'atmosfera di anidride carbonica è stabile.

Ma l'anidride carbonica induce l'effetto serra (vedi capitolo quarto). Se l'atmosfera di anidride carbonica è sottile e relativamente lontana dal sole, e se l'acqua presente è poca, l'effetto è piccolo, come, per esempio, nel caso di Marte.

Si supponga, invece, che l'atmosfera di un pianeta sia abbastanza simile a quella della terra e che esso si trovi altrettanto (o più) vicino al sole. In tal caso, l'effetto serra sarebbe enorme: le temperature salirebbero, causando l'evaporazione degli oceani a ritmo sempre maggiore. L'effetto serra verrebbe accentuato dal vapor d'acqua, e il processo di trasformazione sarebbe accelerato sia con l'aumento della quantità di anidride carbonica presente nell'aria, sia attraverso gli effetti della temperatura sulla crosta. Alla fine, il pianeta sarebbe caldissimo, tutta la sua acqua sarebbe passata nell'atmosfera sotto forma di vapore, che ne nasconderebbe per sempre la superficie sotto una coltre di nubi eterne, ed esso sarebbe caratterizzato da una spessa atmosfera di anidride carbonica.

Questo è esattamente quanto è accaduto a Venere, che ha dovuto subire un effetto serra accelerato. Quel poco di calore in più che riceveva per il fatto di essere più vicina della terra al sole ha innescato tutto quanto il processo.

La terra non ha seguito né l'evoluzione di Marte né quella di Venere.

Il contenuto di azoto della sua atmosfera non è penetrato nella crosta, lasciando un sottile e freddo vento di anidride carbonica, come su Marte; e neppure è accaduto che l'effetto serra trasformasse il pianeta in un mondo soffocante, desertico, caldissimo, come è avvenuto su Venere. È successo qualcosa di diverso, e questo qualcosa è stato l'evolversi della vita, forse fin da quando l'atmosfera era ancora nello stadio ammoniaca/metano.

Le reazioni indotte dalla vita negli oceani terrestri hanno causato la dissociazione dei composti azotati, liberando azoto molecolare; era così assicurata la permanenza nell'atmosfera di una grande quantità di questo gas. In più, le cellule hanno sviluppato la capacità di dissociare le molecole di acqua in idrogeno e ossigeno, usando l'energia della luce visibile, che non viene bloccata dall'ozono.

L'idrogeno si è combinato con l'anidride carbonica formando le complesse molecole che costituiscono la cellula, mentre l'ossigeno veniva liberato nell'atmosfera. È stato così, grazie alla vita, che l'atmosfera della terra si è trasformata da un'atmosfera di azoto e anidride carbonica in un'altra di azoto e ossigeno. L'effetto serra ha subìto una forte riduzione: la terra è rimasta fresca, capace di conservare il suo bene unico, un oceano di acqua liquida e un'atmosfera ricca di ossigeno libero.

In realtà, la nostra atmosfera ricca di ossigeno potrebbe essere una caratteristica solo dell'ultimo 10 per cento della durata dell'esistenza della terra; anche solo 600 milioni di anni fa, può darsi che l'atmosfera contenesse soltanto un decimo dell'ossigeno che contiene oggi.

In ogni caso è a quest'atmosfera ricca di ossigeno libero, così com'è oggi, che dobbiamo la vita nostra e degli altri viventi; e quest'atmosfera a sua volta deve la propria esistenza ad altri, più antichi esseri viventi.

Capitolo 6.
GLI ELEMENTI.

LA TAVOLA PERIODICA.

Fin qui ci siamo occupati dei corpi di grandi dimensioni dell'universo - le stelle e le galassie, il sistema solare, la terra e la sua atmosfera. Ora vogliamo considerare la natura delle sostanze che li compongono.

LE PRIME TEORIE.

I primi filosofi greci, che affrontavano i problemi con un atteggiamento teoretico e speculativo, stabilirono che la terra era fatta di pochissimi elementi, o sostanze fondamentali. Empedocle di Agrigento, nel 430 avanti Cristo circa, ritenne che tali elementi fossero quattro: terra, aria, acqua e fuoco. Un secolo dopo Aristotele propose che i cieli fossero costituiti di un quinto elemento, l'"etere". I successori dei greci nello studio della materia, gli alchimisti medioevali, si impantanarono nella magia e in pratiche ciarlatanesche, arrivando però a conclusioni più ragionevoli e avvedute di quelle dei greci, perché essi, almeno, toccavano con mano i materiali intorno a cui teorizzavano.

Cercando di spiegare le varie proprietà delle sostanze, gli alchimisti associarono tali proprietà ad alcuni elementi regolatori che aggiunsero alla lista degli elementi primi: essi identificarono nel mercurio quello che conferiva alle sostanze le proprietà metalliche, e nello zolfo quello che trasmetteva la proprietà dell'infiammabilità.

Nel sedicesimo secolo uno degli ultimi - e migliori - alchimisti, il medico svizzero Theophrastus Bombast von Hohenheim, più noto come Paracelso, vi aggiunse il sale, come elemento che conferiva la resistenza al calore.

Gli alchimisti ritenevano che si potesse trasformare una sostanza in un'altra semplicemente aggiungendo e sottraendo elementi nelle dovute proporzioni. Per esempio, un metallo come il piombo avrebbe potuto essere trasformato in oro aggiungendovi la quantità esatta di mercurio. La ricerca della formula che doveva convertire il metallo vile in oro andò avanti per secoli, e gli alchimisti, nel perseguire tale ricerca, scoprirono sostanze ben più importanti dell'oro, come gli acidi minerali e il fosforo.

Gli acidi minerali - acido nitrico, acido cloridrico e, in particolare, acido solforico (preparato per la prima volta intorno al 1300) - consentirono di compiere una svolta rivoluzionaria negli esperimenti di alchimia. Queste sostanze erano molto più efficaci dell'acido più forte conosciuto fino ad allora, l'acido acetico, e consentivano di decomporre altre sostanze senza ricorrere ad alte temperature e a tempi lunghi. Anche oggi gli acidi minerali, soprattutto l'acido solforico, sono essenziali nell'industria: si suol dire che il grado di industrializzazione di un paese si può dedurre dal suo consumo annuo di acido solforico.

Ciononostante, ben pochi alchimisti permisero che questi importanti argomenti collaterali li distraessero da quella che consideravano la ricerca principale. Qualche membro della corporazione privo di scrupoli si abbassò alla truffa vera e propria, producendo oro con giochi di prestigio per ottenere da ricchi protettori quelli che oggi chiameremmo «fondi per la ricerca», il che procacciò una così cattiva reputazione alla professione che si dovette abbandonare il nome stesso di alchimista. Nel Seicento, l'"alchimista" divenne "chimico", e l'alchimia fu promossa a scienza, con il nome di "chimica".

Uno dei primi «nuovi chimici» fu Robert Boyle, colui al quale si deve la legge dei gas, detta appunto legge di Boyle (vedi capitolo quinto).

Nel suo libro "Il chimico scettico", pubblicato nel 1661, egli espose per primo il concetto moderno di "elemento": una sostanza fondamentale che si può combinare con altri elementi, formando dei "composti", mentre, una volta isolata da un composto, non si può ridurre a sostanze più semplici.

Tuttavia, Boyle conservava una concezione medioevale della natura reale degli elementi. Per esempio, credeva che l'oro non fosse un elemento e potesse essere fabbricato, in qualche modo, a partire da altri metalli. Lo credeva, a dire il vero, anche il suo contemporaneo Isaac Newton, che dedicò gran parte del proprio tempo all'alchimia. (Ancora nel 1867, del resto, l'imperatore dell'Austria-Ungheria Francesco Giuseppe finanziò degli esperimenti per fabbricare l'oro.)

Nel secolo successivo a quello di Boyle, la sperimentazione nel campo della chimica cominciò a chiarire quali sostanze si potessero ridurre in sostanze più semplici e quali no. Henry Cavendish mostrò che l'idrogeno si combinava con l'ossigeno formando l'acqua, e che quindi l'acqua non poteva essere un elemento. In seguito Lavoisier scompose il presunto elemento aria in ossigeno e azoto; a questo punto era ormai chiaro che nessuno degli elementi dei greci era tale, secondo il criterio di Boyle.

Quanto agli elementi degli alchimisti, risultò che il mercurio e lo zolfo erano davvero tali «secondo Boyle»; ma lo erano anche il ferro, lo stagno, il piombo, il rame, l'argento, l'oro e alcune sostanze non metalliche, come il fosforo, il carbonio e l'arsenico. Infine, l'«elemento» sale di Paracelso fu scomposto in due sostanze più semplici.

Naturalmente la lista degli elementi dipendeva dalla chimica del tempo: fintantoché non si riusciva a scomporre una sostanza con le tecniche chimiche disponibili al momento, la si poteva considerare un elemento. Per esempio, l'elenco di trentatré elementi compilato da Lavoisier comprendeva la calce e la magnesia, ma quattordici anni dopo la sua morte (fu ghigliottinato durante la Rivoluzione francese) il chimico inglese Humphry Davy, servendosi della corrente elettrica, scompose la calce in ossigeno più un nuovo elemento cui diede il nome di "calcio", e la magnesia in ossigeno e in un altro nuovo elemento che chiamò "magnesio".

D'altra parte, Davy riuscì a mostrare che un gas verde ottenuto dal chimico svedese Carl Wilhelm Scheele a partire dall'acido cloridrico non era un composto dell'acido cloridrico stesso e dell'ossigeno, come si era creduto, ma un vero elemento, a cui Davy diede il nome di "cloro" (dal termine greco che significa «verde»).

LA TEORIA ATOMICA.

All'inizio del diciannovesimo secolo si sviluppò un modo radicalmente nuovo di considerare gli elementi, modo che riprendeva le idee di alcuni greci, ai quali, malgrado tutto, si deve quello che è risultato forse il più importante strumento concettuale per la comprensione della natura della materia.

I greci si erano chiesti se la materia fosse continua o discreta, cioè se si potesse continuare a suddividerla indefinitamente in particelle sempre più piccole, oppure se alla fine risultasse composta di particelle indivisibili. Leucippo di Mileto e il suo discepolo Democrito di Abdera avevano sostenuto, intorno al 450 avanti Cristo, quest'ultima soluzione. Anzi, Democrito diede un nome a tali particelle ultime: le chiamò "atomi" (che significa «indivisibili»).

Egli ipotizzò anche che sostanze diverse fossero composte di atomi (o loro combinazioni) diversi, e che una sostanza si potesse trasformare in un'altra in seguito a redistribuzione degli atomi. Se si pensa che tutto ciò non era che una intelligente congettura, si resta stupefatti della correttezza dell'intuizione di Democrito. Anche se oggi l'idea può apparire ovvia, lo era tanto poco a quei tempi che Platone e Aristotele senz'altro la rifiutarono.

L'idea di Democrito sopravvisse, tuttavia, negli insegnamenti di Epicuro di Samo, che scrisse intorno al 300 avanti Cristo, e nella scuola filosofica cui egli diede origine, l'epicureismo. Una figura di rilievo di questa scuola fu il filosofo romano Lucrezio, che, intorno al 60 avanti Cristo, si ispirò alle concezioni atomistiche nel suo lungo poema "De rerum natura". Il poema sopravvisse in qualche modo al Medioevo, e fu una delle prime opere a essere stampate dopo l'invenzione della nuova tecnica.

Il concetto di atomo non fu quindi mai del tutto estraneo alla cultura degli studiosi occidentali. Tra i più eminenti atomisti all'alba della scienza moderna furono il filosofo italiano Giordano Bruno e il filosofo francese Pierre Gassendi. Bruno sostenne parecchie tesi scientifiche non ortodosse, come la credenza in un universo infinito, in cui le stelle erano concepite come soli lontani intorno ai quali ruotavano dei pianeti, ed espose le proprie idee con coraggio. Arso vivo come eretico nel 1600, fu il principale martire della rivoluzione scientifica. Per onorarlo, i russi hanno dato il suo nome a un cratere situato sull'altra faccia della luna.

Le idee di Gassendi influenzarono fortemente Boyle, il quale con i suoi esperimenti aveva mostrato che i gas si possono comprimere o far espandere, e che quindi essi devono essere composti di particelle alquanto distanziate l'una dall'altra. Tanto Boyle che Newton furono dunque tra gli atomisti convinti del diciassettesimo secolo.

Nel 1799, il chimico francese Joseph Louis Proust mostrò che il carbonato di rame, comunque lo si preparasse, conteneva proporzioni definite, in peso, di rame, carbonio e ossigeno; tali proporzioni erano pari a rapporti tra numeri interi molto bassi: 5, 4 e 1. Proust proseguì, mostrando che numerosi altri composti si trovavano in situazione analoga.

Tale situazione trovava una spiegazione se si assumeva che i composti fossero formati dall'unione di piccoli numeri di frammenti di ogni elemento, che potevano combinarsi solo come oggetti interi. Il chimico inglese John Dalton fece osservare tale circostanza nel 1803, e, nel 1808, pubblicò un libro in cui mostrava che l'intera scienza chimica sviluppatasi nell'ultimo secolo e mezzo acquistava un senso coerente supponendo che tutta la materia fosse composta di atomi indivisibili. (Dalton mantenne il vecchio termine greco in omaggio ai pensatori dell'antichità.) Non ci volle molto tempo perché questa "teoria atomica" persuadesse la maggior parte dei chimici.

Secondo Dalton, ogni elemento è caratterizzato da un tipo particolare di atomo, e qualsiasi quantità di tale elemento è costituita da atomi di quel tipo, tra loro identici. Ciò che distingue un elemento da un altro è la natura dei suoi atomi, mentre la differenza fisica fondamentale fra i vari atomi è il loro peso. Così gli atomi di zolfo sono più pesanti di quelli di ossigeno che, a loro volta, sono più pesanti di quelli di azoto; questi, poi, sono più pesanti degli atomi di carbonio, i quali, infine, sono più pesanti di quelli di idrogeno.

Il chimico italiano Amedeo Avogadro applicò la teoria atomica ai gas riuscendo a dimostrare che era ragionevole supporre che volumi uguali di gas (di qualsivoglia natura) contenessero uno stesso numero di particelle; questa è quella che viene chiamata "ipotesi di Avogadro".

In un primo tempo si pensò che queste particelle fossero gli atomi, ma venne in seguito dimostrato che nella maggior parte dei casi si trattava di piccoli gruppi di atomi chiamati "molecole". Se una molecola contiene atomi di tipi diversi (come la molecola di acqua, che è formata di un atomo di ossigeno e due atomi di idrogeno), è una molecola di un "composto chimico".

Naturalmente divenne importante misurare i pesi relativi di atomi diversi, per trovare quelli che venivano detti "pesi atomici" degli elementi. Ma i minuscoli atomi in se stessi erano irrimediabilmente fuori della portata delle tecniche di determinazione del peso del diciannovesimo secolo. Tuttavia, pesando la quantità di ogni elemento ottenuta per analisi da un composto e osservandone il comportamento chimico, si riuscì a calcolare i pesi relativi degli atomi. Il primo a perseguire sistematicamente questo obiettivo fu il chimico svedese Jons Jakob Berzelius. Nel 1828,

egli pubblicò un elenco di pesi atomici basato su due standard: uno assegnava all'ossigeno il peso atomico arbitrario 100; l'altro poneva il peso atomico dell'idrogeno pari a 1.

Il sistema di Berzelius non ebbe immediatamente fortuna; ma nel 1860, al primo Congresso internazionale di chimica, a Karlsruhe, in Germania, il chimico italiano Stanislao Cannizzaro presentò dei nuovi metodi per determinare i pesi atomici avvalendosi dell'ipotesi di Avogadro, che fino ad allora era stata trascurata. Cannizzaro espose le sue idee in modo talmente convincente che tutto il mondo della chimica ne restò conquistato.

Fu il peso dell'ossigeno, e non quello dell'idrogeno, a essere adottato come unità di misura in quel periodo, perché l'ossigeno può essere combinato più facilmente con i vari elementi (e la combinazione con gli altri elementi era il passaggio essenziale del metodo comune di determinazione del peso atomico). Il chimico belga Jean Servais Stas, nel 1850, pose arbitrariamente il peso atomico dell'ossigeno pari esattamente a 16, in modo che il peso atomico dell'idrogeno, l'elemento più leggero noto, fosse approssimativamente pari a 1 (1,0080, per l'esattezza).

Fin dai tempi di Cannizzaro i chimici hanno cercato di raggiungere una sempre maggior precisione nella determinazione dei pesi atomici. Si raggiunse il massimo ottenibile con metodi puramente chimici nel 1904 e negli anni seguenti, allorché il chimico americano Theodore William Richards determinò i pesi atomici con una precisione mai ottenuta in precedenza. Richards ricevette per il suo lavoro il premio Nobel per la chimica nel 1914. In base alle successive scoperte sulla costituzione fisica degli atomi, i valori di Richards sono stati via via ritoccati, raggiungendo una precisione ancora maggiore.

Durante tutto il diciannovesimo secolo, nonostante il fatto che l'ingente lavoro svolto su atomi e molecole avesse generalmente convinto gli scienziati della loro realtà, non esistevano prove dirette che dimostrassero che essi erano qualcosa di più che utili astrazioni. Alcuni eminenti scienziati, come il chimico tedesco Wilhelm Ostwald, si rifiutavano di annettere loro qualsiasi altro significato: per Ostwald, atomi e molecole erano utili, ma non «reali».

La realtà delle molecole fu messa in evidenza dal "moto browniano", un fenomeno osservato per la prima volta nel 1827 dal botanico scozzese Robert Brown, che notò che grani di polline in sospensione nell'acqua si muovevano qua e là disordinatamente. In un primo tempo si credette che il loro moto fosse dovuto alla presenza di vita nel polline; ma anche particelle di coloranti - del tutto inanimate - aventi dimensioni parimenti ridotte si comportavano allo stesso modo.

Nel 1863 si avanzò per la prima volta l'ipotesi che il moto fosse dovuto al bombardamento irregolare delle particelle da parte delle molecole di acqua circostanti. Oggetti di grandi dimensioni non risentirebbero di una lieve differenza nel numero di molecole che li colpissero rispettivamente da destra e da sinistra, mentre oggetti microscopici bombardati solo da qualche centinaio di molecole al secondo possono esibire un moto ondeggiante, dovuto a una piccola eccedenza di urti ora da una parte ora dall'altra. Il moto casuale delle minuscole particelle è una dimostrazione quasi visibile del fatto che l'acqua - e la materia in generale - ha struttura "granulare".

Einstein fornì un'analisi teorica di questa spiegazione del moto browniano, mostrando che si potevano calcolare le dimensioni delle molecole di acqua partendo dall'ampiezza dei piccoli moti disordinati delle particelle di colorante. Nel 1908 il fisico francese Jean Perrin studiò il modo in cui le particelle scendono nell'acqua sotto l'effetto della gravità; esse devono superare l'opposizione derivante dalle collisioni con le molecole sottostanti; il moto browniano si oppone quindi alla forza gravitazionale. Perrin usò questo fenomeno per calcolare le dimensioni delle molecole di acqua mediante l'equazione di Einstein, e a quel punto lo stesso Ostwald dovette arrendersi. Per le sue ricerche Perrin ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1926.

L'atomo, dunque, ha subìto un'evoluzione da astrazione semimistica a oggetto pressoché tangibile. E oggi possiamo davvero dire di aver finalmente «visto» gli atomi. Questo è stato reso possibile dal "microscopio ionico a emissione di campo", inventato nel 1955 da Erwin W. Mueller dell'Università dello stato della Pennsylvania: il suo strumento strappa alcuni ioni carichi

positivamente dalla punta di un ago sottilissimo, sparandoli su uno schermo fluorescente in modo da produrre un'immagine ingrandita 5 milioni di volte della punta dell'ago. Questa immagine rende effettivamente visibili, sotto forma di puntini luminosi, i singoli atomi che compongono la punta. La tecnica è stata migliorata fino a consentire di ottenere immagini dei singoli atomi. Il fisico americano Albert Victor Crewe ha riferito di aver potuto osservare nel 1970 singoli atomi di uranio e di torio con un microscopio elettronico a scansione.

LA TAVOLA PERIODICA DI MENDELEEV.

Via via che nel diciannovesimo secolo si allungava l'elenco degli elementi, i chimici cominciarono ad avere l'impressione di inoltrarsi in una giungla sempre più fitta. Ogni elemento aveva proprietà diverse e nell'elenco non si scorgevano segni che facessero intravedere un qualsivoglia ordine soggiacente. Dato che la scienza è caratterizzata dal tentativo di trovare ordine nel disordine apparente, gli scienziati si misero a caccia di una qualche regolarità nelle proprietà degli elementi.

Nel 1862, dopo che Cannizzaro aveva fatto del peso atomico uno dei principali strumenti di lavoro della chimica, un geologo francese, Alexander Emile Béguyer de Chancourtois, scoprì che, disponendo in una tabella gli elementi ordinati secondo il peso atomico crescente, si poteva fare in modo che quelli aventi proprietà simili si trovassero nella stessa colonna verticale. Due anni dopo un chimico inglese, John Alexander Reina Newlands, arrivò in modo indipendente alla stessa disposizione. Ma entrambi gli scienziati vennero ignorati o ridicolizzati, e nessuno dei due riuscì a pubblicare in forma dignitosa le proprie proposte. Molti anni dopo, quando ormai era stata universalmente riconosciuta l'importanza della tavola periodica, i loro lavori vennero finalmente pubblicati, e Newlands ricevette addirittura una medaglia.

Fu il chimico russo Dmitrij Ivanovic' Mendeleev che ebbe il merito di mettere finalmente ordine nella giungla degli elementi. Nel 1869 Mendeleev e il chimico tedesco Julius Lothar Meyer proposero entrambi una tavola degli elementi, la cui idea centrale era essenzialmente la stessa di quella di de Chancourtois e Newlands; ma fu Mendeleev a ottenere il riconoscimento perché ebbe il coraggio e la fiducia necessari per sviluppare l'idea più a fondo degli altri.

In primo luogo, la "tavola periodica" di Mendeleev (così chiamata perché mostrava il ripetersi periodico di proprietà chimiche simili) era più complessa di quella di Newlands, e più prossima a ciò che oggi sappiamo essere giusto. Secondo, nei casi in cui le proprietà di un elemento comportavano il suo inserimento in una casella diversa da quella corrispondente al suo peso atomico, Mendeleev coraggiosamente cambiava l'ordine, sostenendo che le proprietà sono più importanti del peso atomico. I fatti in seguito gli diedero ragione, come vedremo più avanti in questo stesso capitolo. Per esempio, il tellurio, con un peso atomico di 127,61, dovrebbe venire dopo lo iodio, che ha peso atomico 126,91, seguendo il criterio dei pesi atomici; mettendo invece il tellurio prima dello iodio, esso risulta sotto al selenio, a cui somiglia molto, mentre lo iodio in tal modo risulta sotto al bromo, suo parente stretto.

Infine - ed è la cosa più importante - là dove Mendeleev non trovava altro modo per far funzionare le cose, non esitò a lasciare dei posti vuoti nella tavola, annunciando, con quella che apparve una sicumera inaudita, che si sarebbero in futuro scoperti gli elementi che avrebbero riempito le caselle vuote. E si spinse ancora oltre. Per tre di tali buchi descrisse gli elementi che dovevano riempirli, utilizzando come guida le proprietà degli elementi soprastanti e sottostanti nella tabella. E qui Mendeleev ebbe un colpo di fortuna.

Tutti e tre gli elementi da lui previsti furono scoperti mentre era ancora in vita, consentendogli di assistere al trionfo del suo sistema. Nel 1875 il chimico francese Lecoq de Boisbaudran scoprì il primo di questi elementi mancanti, che chiamò "gallio". Nel 1879 il chimico svedese Lars Fredrik Nilson trovò il secondo, che denominò "scandio" (da Scandinavia). E nel 1886

il chimico tedesco Clemens Alexander Winkler isolò il terzo, che denominò "germanio". Tutti e tre gli elementi presentavano con considerevole precisione le proprietà previste da Mendeleev.

I NUMERI ATOMICI.

Con la scoperta dei raggi X effettuata da Roentgen si aprì una nuova era nella storia del sistema periodico. Nel 1911 il fisico inglese Charles Glover Barkla scoprì che quando i raggi X vengono diffusi da un metallo acquistano un ben definito potere di penetrazione, che dipende dal metallo; in altre parole, ogni elemento produce la propria "radiazione X caratteristica". Per la sua scoperta Barkla ricevette il premio Nobel per la fisica del 1917.

C'era un certo dibattito sulla questione se i raggi X fossero fasci di minuscole particelle o avessero natura ondulatoria come la luce. Un sistema per stabilirne la natura consisteva nel verificare se i raggi X potessero essere "diffratti" (cioè obbligati a cambiar direzione) da un "reticolo di diffrazione", formato da una serie di tratti sottili.

Per ottenere la diffrazione, però, è necessario che il passo del reticolo (cioè la distanza fra i singoli tratti) sia approssimativamente pari alla lunghezza d'onda della radiazione. I reticoli di passo più corto che si potevano allestire erano sufficienti per la luce ordinaria, ma il potere di penetrazione dei raggi X faceva prevedere che, ove questi avessero avuto natura ondulatoria, le loro lunghezze d'onda sarebbero state molto inferiori a quelle della luce; pertanto i normali reticoli di diffrazione non erano adatti per la diffrazione dei raggi X.

Fu il fisico tedesco Max Theodore Felix von Laue a pensare ai cristalli come a reticoli di diffrazione naturali, assai più fini di quelli artificiali. Un cristallo è un solido con una forma rigorosamente geometrica, dotato di facce piane che si incontrano formando angoli caratteristici, nonché di una simmetria caratteristica. Questa regolarità visibile è dovuta alla disposizione regolare degli atomi che ne costituiscono la struttura. Alcuni fatti facevano pensare che le distanze tra strati contigui di atomi fossero dell'ordine di grandezza delle lunghezze d'onda dei raggi X. In tal caso, i cristalli dovevano dar luogo alla diffrazione dei raggi X.

Laue fece degli esperimenti e verificò che i raggi X che attraversavano un cristallo venivano effettivamente diffratti e formavano su una lastra fotografica una figura che ne denunciava la natura ondulatoria. Nello stesso anno il fisico inglese William Lawrence Bragg insieme al padre, William Henry Bragg, fisico eminente anch'egli, elaborò un metodo per calcolare con precisione la lunghezza d'onda di un dato tipo di raggio X in base alla sua figura di diffrazione. Inversamente, le figure di diffrazione dei raggi X furono in seguito usate per determinare l'orientamento esatto degli strati di atomi che provocano la diffrazione. In tal modo i raggi X resero possibile una nuova comprensione della struttura atomica dei cristalli. Per il lavoro sui raggi X, Laue ricevette il premio Nobel per la fisica del 1914 e i Bragg ottennero quello del 1915.

Poi, nel 1914, il giovane fisico inglese Henry Gwyn-Jeffreys Moseley determinò le lunghezze d'onda dei raggi X caratteristici prodotti da vari metalli, arrivando all'importante scoperta che la lunghezza d'onda diminuiva con regolarità man mano che si procedeva nella tavola periodica.

Questo assegnava agli elementi una posizione definita nella tavola. Se due elementi creduti adiacenti nella tavola davano origine a raggi X le cui lunghezze d'onda differivano il doppio del previsto, tra di loro doveva esservi un posto vuoto, che apparteneva a un elemento ancora sconosciuto. Se la differenza era tripla, i posti vuoti dovevano essere due; se invece i raggi X caratteristici dei due elementi differivano nella misura prevista, si poteva esser certi che tra di loro non c'era alcun elemento mancante.

A questo punto era possibile assegnare un ben definito numero d'ordine a ogni elemento. Fino ad allora c'era sempre stata la possibilità che un nuovo elemento si inserisse nella sequenza, mandando all'aria qualsiasi sistema di numerazione adottato. Ora non potevano più esserci posti vuoti insospettati.

I chimici numerarono quindi gli elementi da 1 (idrogeno) a 92 (uranio). Risultò poi che i "numeri atomici" così ottenuti erano importanti dal punto di vista della struttura interna degli atomi (vedi capitolo settimo), ben più di quanto non lo fossero i pesi atomici. Per esempio, i dati forniti dai raggi X mostrarono che Mendeleev aveva avuto ragione nel porre il tellurio (numero atomico 52) prima dello iodio (numero atomico 53), nonostante il maggior peso atomico del primo.

Il nuovo sistema di Moseley dimostrò quasi subito la propria grande utilità. Il chimico francese Georges Urbain, dopo aver scoperto il "lutezio" (il cui nome deriva dall'antico nome latino di Parigi), aveva in seguito annunciato di aver scoperto un altro elemento che denominò "celtio". Secondo il sistema di Moseley, il lutezio era l'elemento 71 e il celtio doveva essere il 72. Ma quando Moseley analizzò i raggi X caratteristici del celtio, risultò che si trattava ancora del lutezio. L'elemento 72 fu effettivamente scoperto solo nel 1923, quando il fisico danese Dirk Coster e il chimico ungherese Georg von Hevesy lo identificarono in un laboratorio di Copenaghen, e lo chiamarono "afnio" (dal nome latinizzato di Copenaghen).

Moseley non poté assistere a questa verifica dell'accuratezza del suo metodo: era stato ucciso a Gallipoli nel 1915, all'età di ventotto anni - certamente una delle vite più preziose perse nella prima guerra mondiale. Probabilmente questa morte precoce lo defraudò anche di un premio Nobel. Il fisico svedese Karl Manne George Siegbahn estese l'opera di Moseley, scoprendo nuove serie di righe dei raggi X e determinando con cura gli spettri dei raggi X di vari elementi.

Ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1924.

Nel 1925, Walter Noddack, Ida Tacke e Otto Berg in Germania colmarono un'altra lacuna del sistema periodico. Dopo un'indagine durata tre anni sui minerali che contenevano gli elementi affini a quello di cui andavano in cerca, isolarono l'elemento 75 e lo chiamarono "renio", in onore del fiume Reno. Restavano così solo quattro posti vuoti: le caselle corrispondenti agli elementi 43, 61, 85 e 87.

Ci vollero altri due decenni per scovare questi quattro elementi.

Benché i chimici allora non se ne rendessero conto, con il renio avevano trovato l'ultimo degli elementi stabili. Quelli mancanti erano di una specie instabile, così rara oggi sulla terra che tre di essi dovettero essere creati in laboratorio per venire identificati. E qui bisogna tornare indietro negli anni e raccontare un altro episodio.

GLI ELEMENTI RADIOATTIVI.

IDENTIFICAZIONE DEGLI ELEMENTI.

Dopo la scoperta dei raggi X nel 1895, molti scienziati furono spinti allo studio di queste nuove e così penetranti radiazioni. Uno di loro era il fisico francese Antoine-Henri Becquerel, il cui padre, Alexandre Edmond (il fisico che per primo aveva fotografato lo spettro solare), si era interessato in modo particolare della fluorescenza, il fenomeno per cui certe sostanze, dopo essere state esposte ai raggi ultravioletti presenti nella luce solare, emettono radiazione visibile.

Becquerel padre aveva, in particolare, studiato il "solfato di potassio-uranile", un composto la cui molecola contiene un atomo di uranio. Henri si chiese se le radiazioni fluorescenti emesse da questa sostanza contenessero raggi X. Per scoprirlo, occorreva esporre il solfato alla luce solare (in modo che gli ultravioletti eccitassero la fluorescenza), collocando il composto su una lastra fotografica avvolta in carta nera. Poiché la luce solare non poteva penetrare attraverso la carta nera, non avrebbe impressionato la lastra, ma se la fluorescenza eccitata da tale luce avesse contenuto raggi X, questi avrebbero attraversato la carta, impressionando la lastra. Becquerel tentò l'esperimento nel 1896, con esito positivo. Sembrava proprio che vi fossero raggi X nella fluorescenza. Becquerel riuscì addirittura a far attraversare dai presunti raggi X sottili fogli di alluminio e di rame, risolvendo così apparentemente la questione, dato che nessuna radiazione nota, oltre ai raggi X, era in grado di fare altrettanto.

Ma poi, per un grosso colpo di fortuna (anche se certamente Becquerel sul momento non lo considerò tale), intervenne un periodo di brutto tempo. Aspettando il ritorno delle giornate di sole, Becquerel ripose in un cassetto le sue lastre, cosparse di qualche pizzico di solfato.

Dopo diversi giorni, impaziente, decise di sviluppare comunque le lastre, pensando che forse, anche in assenza di luce solare diretta, era stata prodotta qualche traccia di raggi X.

Quando vide le immagini sviluppate, Becquerel visse uno di quei momenti di profondo stupore e di gioia che sono il sogno di tutti gli scienziati. La lastra fotografica era rimasta intensamente annerita da una forte radiazione! Ne doveva essere responsabile qualcosa di diverso dalla luce solare o dalla fluorescenza. Becquerel decise (e ben presto gli esperimenti gli diedero ragione) che questo «qualcosa» era l'uranio contenuto nel solfato di potassio-uranile.

La scoperta elettrizzò ulteriormente gli scienziati, già fortemente stimolati dalla recente scoperta dei raggi X; uno degli scienziati che si mise subito a studiare la strana radiazione emessa dall'uranio fu una giovane chimica di origine polacca, Marya Sklodowska, che aveva sposato proprio l'anno prima Pierre Curie, colui che aveva scoperto la temperatura detta "punto di Curie" (vedi capitolo quinto).

Pierre Curie, in collaborazione con il fratello Jacques, aveva anche scoperto che certi cristalli, sottoposti a pressione, acquistano una carica elettrica positiva da una parte e negativa dall'altra. Questo fenomeno viene chiamato "piezoelettricità" (dal verbo greco che significa «esercitare una pressione»). Marie Curie pensò di misurare la radiazione emessa dall'uranio attraverso la piezoelettricità e allestì un esperimento in cui questa radiazione ionizzava l'aria tra due elettrodi, provocando il passaggio di una piccola corrente, di cui si misurava l'intensità in funzione della pressione che occorreva esercitare su un cristallo per produrre una controcorrente che bilanciasse la prima. Questo metodo funzionò così bene che Pierre Curie abbandonò immediatamente il proprio lavoro e per il resto della sua vita affiancò la moglie Marie come assistente pieno di zelo.

Marie Curie, dopo aver proposto il termine "radioattività" per descrivere la capacità dell'uranio di emettere radiazioni, proseguì i suoi esperimenti dimostrando la presenza del fenomeno in una seconda sostanza radioattiva: il torio. In rapida successione anche altri scienziati fecero scoperte di importanza eccezionale. La radiazione penetrante emessa dalle sostanze radioattive si dimostrò ancor più penetrante e più energetica dei raggi X; si trattava dei "raggi gamma". Si trovò che gli elementi radioattivi emettono anche altri tipi di radiazione, che portarono a varie scoperte sulla struttura interna dell'atomo - questo, pero, costituirà l'argomento di un altro capitolo (vedi capitolo settimo). Il fatto che ebbe maggiore importanza per la discussione sulla struttura della materia fu la scoperta che gli elementi radioattivi, nell'emettere la radiazione, si trasformavano in elementi diversi - una versione moderna della "trasmutazione" alchemica.

Marie Curie fu la prima a imbattersi, quasi per caso, nelle implicazioni che tale fenomeno comportava. Nel saggiare il contenuto di uranio della pechblenda, per vedere se certi campioni del minerale ne contenevano abbastanza perché convenisse raffinarlo, i Curie scoprirono con sorpresa che alcuni pezzi erano più radioattivi che se fossero stati costituiti di uranio puro. Naturalmente ciò implicava che nella pechblenda fossero presenti altri elementi radioattivi, che certamente non potevano che essere in quantità minime, perché non erano stati rivelati dalla normale analisi chimica; dovevano dunque avere una radioattività davvero alta.

I coniugi Curie, sempre più eccitati, si procurarono tonnellate di pechblenda, installarono un'officina in una baracca e - in condizioni primitive, potendo contare solo sul loro inesauribile entusiasmo - procedettero nella lotta con il pesante minerale nero, alla ricerca di tracce dei nuovi elementi. Nel luglio del 1898 avevano isolato una piccolissima quantità di polvere nera che aveva una radioattività pari a 400 volte quella di una quantità analoga di uranio.

Essa conteneva un nuovo elemento, le cui proprietà chimiche erano simili a quelle del tellurio: probabilmente si doveva allora trovare sotto tale elemento nella tavola periodica. (Più tardi

gli fu assegnato il numero atomico 84.) I Curie lo chiamarono "polonio", in onore della patria di Marie.

Il polonio, però, rendeva ragione solo di una parte della radioattività. Seguì un ulteriore lavoro e, nel dicembre 1898, i Curie avevano ottenuto un preparato ancora più radioattivo del polonio, che conteneva un altro nuovo elemento, con proprietà simili a quelle del bario. (Esso venne poi sistemato sotto il bario, e si trovò che il suo numero atomico era 88.) I Curie lo chiamarono "radio", appunto a causa della sua intensa radioattività.

Essi lavorarono altri quattro anni per raccogliere abbastanza radio da poterlo vedere. Poi Marie Curie presentò un resoconto di tutto questo lavoro come tesi di dottorato, nel 1903. Fu probabilmente la più importante tesi di dottorato della storia delle scienze: le procurò non uno, ma due premi Nobel. Marie e il marito, insieme a Becquerel, ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1903, per i loro studi sulla radioattività; e nel 1911 Marie (dopo che suo marito, nel 1906, era morto in un incidente stradale) ricevette il premio Nobel per la chimica per la scoperta del polonio e del radio.

Il polonio e il radio sono di gran lunga più instabili dell'uranio e del torio, il che equivale a dire che sono assai più radioattivi. Per i primi due elementi il numero di atomi che si disintegrano in ogni secondo è molto maggiore. La loro vita media è così breve che praticamente tutto il polonio e il radio dell'universo avrebbero dovuto scomparire nel giro di qualche milione di anni. Come mai li troviamo ancora, su questa terra vecchia di miliardi di anni? La risposta è che il radio e il polonio si formano in continuazione nel corso della disintegrazione dell'uranio e del torio, che si tramutano in piombo. Ovunque si trovino uranio e torio, è probabile che si trovino anche tracce di polonio e radio, che sono prodotti intermedi del processo che ha come prodotto finale il piombo.

Altri tre elementi instabili originati dal processo che da uranio e torio porta al piombo furono scoperti attraverso un'analisi accurata della pechblenda o durante le ricerche sulle sostanze radioattive. Nel 1899, André Louis Debierne, dietro suggerimento dei Curie, cercò altri elementi nella pechblenda e ne trovò uno, che chiamò "attinio" (dal termine greco che significa «raggio»), che ricevette poi il numero atomico 89. L'anno dopo, il fisico tedesco Friedrich Ernst Dorn dimostrò che nel decadimento del radio si formava un elemento gassoso.

Un gas radioattivo era una novità! A questo elemento vennero poi dati il nome di "radon" e il numero atomico 86. Infine, nel 1917, due gruppi diversi - Otto Hahn e Lise Meitner in Germania, Frederick Soddy e John Arnold Cranston in Gran Bretagna - isolarono dalla pechblenda l'elemento 91, che venne chiamato "protoattinio".

ALLA RICERCA DEGLI ELEMENTI MANCANTI.

Nel 1925 si era arrivati, così, a ottantotto elementi identificati - ottantuno stabili e sette instabili. A questo punto si scatenò una vera caccia ai quattro elementi mancanti - i numeri 43, 61, 85, 87.

Dato che tutti gli elementi noti tra il numero 84 e il 92 erano radioattivi, ci si aspettava che anche l'85 e l'87 lo fossero. Invece i numeri 43 e 61 si trovavano in mezzo a elementi stabili e non sembrava ci fosse ragione per aspettarsi che non lo fossero a loro volta; di conseguenza, doveva essere possibile trovarli in natura.

Ci si attendeva che l'elemento 43, situato subito sopra al renio nella tavola periodica, ne condividesse le proprietà e si trovasse negli stessi minerali. Anzi, l'équipe di Noddack, Tacke e Berg, che aveva scoperto il renio, era sicura di aver osservato anche dei raggi X di lunghezza d'onda adatta all'elemento 43. Annunciarono quindi la loro scoperta, denominando l'elemento "masurio", dal nome di una regione della Prussia orientale. Ma la loro identificazione non venne confermata: e nella scienza una scoperta non è una scoperta finché non ha una conferma da parte di almeno un altro ricercatore indipendente.

Nel 1926 due chimici dell'Università dell'Illinois annunciarono di aver trovato l'elemento 61 in minerali che contenevano i suoi vicini (gli elementi 60 e 62), e gli diedero il nome di "illinio". In quello stesso anno due chimici dell'Università di Firenze pensarono di aver isolato lo stesso elemento e lo chiamarono "florenzio". Ma altri chimici non riuscirono a trovare conferme del lavoro dei due gruppi.

Pochi anni dopo, un fisico del Politecnico dell'Alabama, usando un metodo di analisi da lui ideato, riferì di aver trovato tracce degli elementi 87 e 85, che chiamò rispettivamente "virginio" e "alabamio", dal nome dello stato in cui era nato e di quello adottivo. Ma neppure queste scoperte trovarono conferma.

Gli eventi successivi dovevano dimostrare che le «scoperte» degli elementi 43, 61, 85 e 87 erano stati degli errori.

Il primo dei quattro a essere identificato al di là di ogni dubbio fu l'elemento 43. Il fisico americano Ernest Orlando Lawrence, che stava per ricevere il premio Nobel per la fisica per l'invenzione del ciclotrone (vedi capitolo settimo), ottenne l'elemento nel suo acceleratore, bombardando il "molibdeno" (elemento 42) con particelle ad alta velocità. Il materiale bombardato divenne radioattivo, e Lawrence lo mandò ad analizzare dal chimico italiano Emilio Gino Segrè, che si interessava del problema dell'elemento 43.

Segrè e il suo collega Carlo Perrier, dopo aver depurato dal molibdeno la componente radioattiva, trovarono che essa aveva proprietà simili a quelle del renio, ma non era renio. Conclusero allora che poteva essere solo l'elemento 43 e che quest'ultimo, a differenza dei suoi vicini nella tavola periodica, era radioattivo. Poiché non viene prodotto dal decadimento di un elemento di numero atomico più elevato, in pratica non se ne trova più nella crosta terrestre, e quindi Noddack e i suoi collaboratori dovevano certamente essersi sbagliati pensando di averlo identificato. Il privilegio di dare un nome all'elemento 43 toccò così alla fine a Segrè e Perrier; ed essi lo chiamarono "tecnezio", da una parola greca che significa «artificiale», perché era il primo elemento fabbricato dall'uomo in laboratorio. Nel 1960 era stato ormai accumulato abbastanza tecnezio per poterne determinare il punto di fusione - prossimo a 2200 gradi C. (In seguito Segrè avrebbe ricevuto il premo Nobel per una scoperta del tutto diversa, che aveva a che fare però di nuovo con un frammento di materia fabbricato in laboratorio - vedi capitolo settimo.)

Nel 1939, l'elemento 87 fu finalmente scoperto in natura. Il chimico francese Marguerite Perey lo isolò tra i prodotti della disintegrazione dell'uranio. L'elemento 87 era presente in quantità piccolissime, e solo tecniche più avanzate consentirono di trovarlo là dove prima lo si era cercato invano. In seguito la Perey diede al nuovo elemento il nome di "francio".

L'elemento 85, come il tecnezio, fu prodotto nel ciclotrone, bombardando il "bismuto" (elemento 83). Nel 1940, Segrè, Dale Raymond Corson e Kenneth Ross Mackenzie isolarono l'elemento 85 all'Università di California (Segrè nel frattempo era emigrato dall'Italia negli Stati Uniti). La seconda guerra mondiale provocò un'interruzione nelle loro ricerche, che vennero riprese dopo la fine della guerra, e portarono alla proposta del 1947 di denominare l'elemento "astato" (da una parola greca che significa «instabile»). A quell'epoca tracce di astato erano state trovate in natura, come nel caso del francio, tra i prodotti del decadimento dell'uranio.

Nel frattempo il quarto e ultimo elemento mancante, il numero 61, era stato scoperto tra i prodotti della fissione dell'uranio, un processo di cui parleremo nel capitolo decimo. (Tra questi prodotti compariva anche il tecnezio.) Tre chimici del National Laboratory di Oak Ridge - J. A. Marinsky, L. E. Glendenin e Charles DuBois Coryell - isolarono nel 1945 l'elemento 61, che chiamarono "promezio", da Prometeo, semidio greco che aveva rubato il fuoco al sole per donarlo all'umanità. L'elemento 61, dopo tutto, era stato rubato al fuoco, simile a quello solare, della fornace atomica.

Così la lista degli elementi, dall'1 al 92, era finalmente completa. Eppure, in un certo senso, la parte più sorprendente dell'avventura era appena cominciata. Infatti gli scienziati avevano infranto i limiti della tavola periodica: l'uranio non costituiva il punto finale.

ELEMENTI TRANSURANICI.

In realtà, la ricerca degli elementi al di là dell'uranio - gli "elementi transuranici" - era cominciata già nel 1934. Enrico Fermi in Italia aveva scoperto che, bombardando un elemento con una particella subatomica da poco scoperta, chiamata "neutrone" (vedi capitolo settimo), spesso l'elemento si trasformava in quello che aveva numero atomico immediatamente superiore. Era dunque possibile ottenere dall'uranio l'elemento 93 - un elemento del tutto artificiale che, per quanto se ne sapeva allora, non esisteva in natura? Il gruppo di Fermi si accinse a bombardare l'uranio con neutroni e ottenne un prodotto che ritenne fosse davvero l'elemento 93: fu chiamato "uranio X".

Nel 1938 Fermi ricevette il premio Nobel per la fisica per i suoi studi sul bombardamento con i neutroni. A quel tempo non si sospettava nemmeno quale fosse la natura reale della sua scoperta e quali ne sarebbero state le future conseguenze per l'umanità. Come un altro italiano, Colombo, anche Fermi aveva trovato, al posto di quello che stava cercando, qualcosa di molto più importante, di cui però non si rendeva conto.

Qui sarà sufficiente dire che, dopo una serie di ricerche che seguivano piste false, si scoprì alla fine che Fermi non aveva creato un elemento nuovo, ma scisso l'uranio in due parti quasi uguali.

Quando, nel 1940, i fisici si accinsero allo studio di questo processo, l'elemento 93 saltò fuori quasi come un risultato casuale dei loro esperimenti. Nel miscuglio di elementi ottenuti bombardando l'uranio con i neutroni, ce ne era uno che sulle prime sfidava ogni tentativo di identificazione. Poi venne in mente a Edwin McMillan dell'Università della California che forse i neutroni liberati nella fissione avevano convertito qualche atomo di uranio in un elemento di numero atomico più alto, come Fermi aveva sperato di riuscire a fare.

McMillan e Philip Abelson, un chimico fisico, riuscirono a dimostrare che l'elemento non identificato era in effetti l'elemento 93. La dimostrazione della sua esistenza stava nella natura della sua radioattività, come doveva accadere per tutte le scoperte successive. McMillan sospettò che all'elemento 93 potesse essere mescolato un altro elemento transuranico. Il chimico Glenn Theodore Seaborg, insieme ai suoi collaboratori Arthur Charles Wahl e Joseph William Kennedy, mostrò poco tempo dopo che le cose stavano effettivamente così, e che questo ulteriore elemento era il numero 94.

Poiché al supposto ultimo elemento della tavola periodica, l'uranio, al tempo della sua scoperta era stato dato un nome ricalcato su quello del pianeta scoperto da poco, Urano, lo stesso si fece per gli elementi 93 e 94, che furono chiamati rispettivamente "nettunio" e "plutonio", in analogia con i pianeti scoperti dopo Urano, cioè Nettuno e Plutone. In seguito si trovò che questi elementi esistono in natura: piccole tracce di nettunio e di plutonio sono state infatti identificate nei minerali di uranio. Dunque l'uranio, malgrado tutto, non era l'elemento più pesante esistente in natura.

Seaborg e un gruppo dell'Università della California, in cui emergeva Albert Ghiorso, continuarono a fabbricare nuovi elementi transuranici, uno dopo l'altro. Nel 1944, bombardando il plutonio con particelle subatomiche, crearono gli elementi 95 e 96, che furono chiamati, rispettivamente, "americio" (da America) e "curio" (in onore dei due Curie). Dopo aver ottenuto una quantità sufficiente di americio e di curio con cui lavorare, li bombardarono, riuscendo a ottenere l'elemento numero 97 nell'anno 1949 e quello numero 98 nell'anno 1950.

Li chiamarono "berkelio" e "californio", da Berkeley e California. Nel 1951 Seaborg e McMillan condivisero il premio Nobel per la chimica per questa serie di risultati.

Gli elementi successivi furono scoperti in circostanze più drammatiche. Gli elementi 99 e 100 si manifestarono nell'esplosione della prima bomba all'idrogeno, fatta detonare nel Pacifico nel 1952.

Anche se la loro presenza era stata rilevata fra le scorie della deflagrazione, non vi fu conferma dell'esistenza di questi elementi fino a quando il gruppo dell'Università della California non ne produsse una piccola quantità in laboratorio, nel 1955; si diedero loro i nomi di "einsteinio" e "fermio", in onore di Albert Einstein ed Enrico Fermi, entrambi morti pochi mesi prima. In seguito il gruppo bombardò una piccola quantità di einsteinio e ottenne l'elemento 101, che denominò "mendelevio", in onore di Mendeleev.

Il passo successivo lo si deve a una collaborazione tra la California e l'Istituto Nobel in Svezia. Quest'ultimo effettuò un bombardamento particolarmente complesso, ottenendo una piccola quantità dell'elemento 102, che denominò "nobelio", in onore dell'istituto stesso. Questo elemento era stato ottenuto con metodi diversi da quelli descritti dal primo gruppo di ricercatori, il che provocò un certo ritardo nel riconoscimento ufficiale del suo nome.

Nel 1961 all'Università di California furono identificati alcuni atomi dell'elemento 103, a cui si diede il nome di "laurenzio", in onore di E. O. Lawrence, morto di recente. Nel 1964 un gruppo di scienziati sovietici diretto da Georgij Nikolaevic' Flerov riferì di aver prodotto l'elemento 104, e, nel 1967, il 105. In entrambi i casi i metodi usati non trovarono conferma; gruppi americani di ricerca sotto la guida di Albert Ghiorso ottennero gli stessi elementi con metodi diversi. Il gruppo sovietico chiamò "kurciatovio" l'elemento 104, in onore di Igor Vasilievic' Kurchatov, che aveva guidato il gruppo di studiosi sovietici che aveva realizzato la bomba atomica, ed era morto nel 1960. Il gruppo americano chiamò l'elemento 104 "rutherfordio" e il 105 "hahnio", in onore di Ernest Rutherford e Otto Hahn, che entrambi avevano fatto scoperte fondamentali sulla struttura subatomica. È stata data notizia dell'esistenza di ulteriori elementi, fino al numero 109.

ELEMENTI SUPERPESANTI.

In questa ascesa sulla scala degli elementi transuranici ogni passo avanti era stato più difficoltoso di quello precedente. A ogni gradino l'elemento era diventato più difficile da accumulare ed era risultato più instabile. Quando infine si arrivò al mendelevio, si dovette procedere all'identificazione basandosi su soli diciassette atomi, non uno di più. Fortunatamente, le tecniche di rivelazione delle radiazioni avevano raggiunto nel 1955 un livello di sofisticazione meraviglioso. Gli scienziati di Berkeley erano giunti a collegare i loro strumenti a un segnale acustico antincendio, così che, ogni volta che si formava un atomo di mendelevio, la radiazione caratteristica che esso emetteva nel disintegrarsi annunciava l'evento con uno squillo trionfante (cosa a cui ben presto i pompieri misero fine).

Gli elementi di numero atomico più alto vennero individuati con metodi ancora più sofisticati. Un singolo atomo di un elemento cercato poteva essere identificato in base a un'attenta osservazione dei suoi prodotti di decadimento.

Ha senso cercare di inoltrarsi ancora più avanti, a parte il brivido di battere un record e di poter iscrivere il proprio nome tra quelli famosi degli scopritori di un elemento? (Lavoisier, il più grande di tutti i chimici, non riuscì mai a fare una simile scoperta, cosa che lo amareggiò molto.)

C'è un'importante scoperta possibile che resta da fare. L'aumento dell'instabilità al crescere del numero atomico non è uniforme.

L'atomo stabile più complesso è il bismuto (83); dopo di esso, i sei elementi dall'84 all'89 incluso sono talmente instabili che qualsiasi quantità presente al tempo della formazione della terra sarebbe già scomparsa ai nostri giorni. Poi, sorprendentemente, seguono il torio (90) e l'uranio (92) che sono quasi stabili. Del torio e dell'uranio originari presenti sulla terra al momento della sua formazione sussistono ancora oggi l'80 per cento del primo e il 50 per cento del secondo. I fisici hanno escogitato delle teorie sulla struttura atomica per spiegare questo fatto (come chiarirò nel prossimo capitolo); se tali teorie sono corrette, gli elementi 110 e 114 dovrebbero essere più stabili di quanto il loro alto numero atomico farebbe pensare: pertanto ottenere questi elementi riveste un notevole interesse, come mezzo per verificare le teorie.

Nel 1976 venne sostenuto che certi "aloni" (segni neri circolari nella mica) avrebbero potuto indicare la presenza di questi "elementi superpesanti". Gli aloni provengono dalla radiazione emessa da piccole quantità di torio e uranio, ma vi è anche qualche alone di grandezza maggiore che deve provenire da atomi aventi una più forte radioattività, che però siano abbastanza stabili da essere arrivati fino ai giorni nostri. Potrebbero essere gli elementi superpesanti.

Sfortunatamente queste deduzioni non hanno incontrato l'approvazione della comunità scientifica, e il suggerimento è stato abbandonato. Gli scienziati sono ancora alla ricerca.

GLI ELETTRONI.

Quando Mendeleev e i suoi contemporanei scoprirono che era possibile disporre gli elementi in una tavola periodica composta di famiglie di sostanze che presentavano proprietà simili, essi non avevano la minima idea della ragione per cui gli elementi facevano parte di queste famiglie e avevano proprietà analoghe. Alla fine, però, emerse una spiegazione chiara e abbastanza semplice, ma ciò solo dopo una lunga serie di scoperte che sulle prime sembravano prive di qualsiasi nesso con la chimica.

Tutto ebbe inizio con gli studi sull'elettricità. Faraday tentò tutti gli esperimenti con l'elettricità che gli vennero in mente, tra cui uno che consisteva nel far passare una scarica elettrica nel vuoto.

Non riuscì, però, a ottenere un vuoto abbastanza spinto per i suoi scopi. Nel 1854, un maestro vetraio tedesco, Heinrich Geissler, costruì un tubo di vetro in cui erano saldati degli elettrodi metallici e in cui, con una pompa da lui stesso inventata, era possibile raggiungere un vuoto molto spinto. Quando gli sperimentatori riuscirono a ottenere scariche elettriche nel "tubo di Geissler", notarono che si manifestava una luminescenza verde sulla parete del tubo opposta all'elettrodo negativo. Nel 1876 il fisico tedesco Eugen Goldstein giunse alla conclusione che tale luminescenza verde dovesse dipendere dall'urto sul vetro di una qualche radiazione originata nell'elettrodo negativo, che Faraday aveva denominato "catodo". Goldstein pertanto chiamò queste radiazioni "raggi catodici".

Si trattava di una forma di radiazione elettromagnetica? Così riteneva Goldstein, ma il fisico inglese William Crookes e alcuni altri sostennero che si trattava piuttosto di un fascio di qualche tipo di particelle. Crookes progettò alcune versioni migliorate del tubo di Geissler (chiamate poi "tubi di Crookes"), con cui poté dimostrare che i raggi venivano deflessi dall'azione di un magnete. Ciò faceva pensare che fossero costituiti di particelle elettricamente cariche.

Nel 1897, il fisico Joseph John Thomson chiarì la questione al di là di ogni dubbio, dimostrando che i raggi catodici potevano essere deviati anche dalle cariche elettriche. Cosa erano, dunque, queste «particelle» catodiche? Le uniche particelle aventi carica negativa note a quell'epoca erano gli ioni negativi. Gli esperimenti mostrarono però che le particelle che costituivano i raggi catodici non potevano essere ioni, perché subivano una così forte deviazione da parte del campo magnetico da far pensare che avessero una carica elettrica inconcepibilmente alta, oppure che fossero particelle estremamente leggere, con una massa inferiore a un millesimo di quella dell'atomo di idrogeno. Risultò che quest'ultima interpretazione si adattava meglio ai fatti. I fisici avevano già avanzato l'ipotesi che la corrente elettrica fosse trasportata da particelle, e così queste particelle catodiche furono accettate come le costituenti ultime dell'elettricità. Vennero chiamate "elettroni" - un nome questo suggerito nel 1891 dal fisico irlandese George Johnstone Stoney. In seguito si stabilì che l'elettrone aveva una massa pari a 1 su 1837 di quella dell'atomo di idrogeno. (Thomson ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1906 per la scoperta dell'elettrone.)

La scoperta dell'elettrone fece pensare subito che esso potesse essere una particella costitutiva dell'atomo - in altri termini, gli atomi non erano quelle unità ultime e indivisibili della materia che Democrito e John Dalton avevano ipotizzato.

Era una pillola amara da mandar giù, ma le prove convergevano inesorabilmente in tale direzione. Tra queste, una delle più convincenti fu la dimostrazione data da Thomson che le particelle di carica negativa emesse da una lastra metallica colpita da radiazione ultravioletta ("effetto fotoelettrico") erano identiche agli elettroni dei raggi catodici. Gli elettroni di origine fotoelettrica dovevano essere espulsi dagli atomi del metallo.

LA PERIODICITÀ DELLA TAVOLA PERIODICA.

Dato che gli elettroni potevano essere sottratti agli atomi con facilità (e non soltanto nell'effetto fotoelettrico), era naturale concludere che dovessero essere collocati nelle regioni più esterne dell'atomo. In tal caso, doveva esservi una regione carica positivamente all'interno dell'atomo, che controbilanciasse le cariche negative degli elettroni, perché normalmente l'atomo nel suo complesso era neutro. Fu a questo punto che i ricercatori cominciarono ad avvicinarsi alla soluzione del mistero del sistema periodico. Occorre una certa quantità di energia per strappare un elettrone da un atomo; inversamente, quando un elettrone cade nel posto rimasto vacante all'interno dell'atomo, deve "cedere" una quantità uguale di energia. (Solitamente in natura vige la simmetria, soprattutto quando c'è di mezzo l'energia.) Tale energia viene liberata sotto forma di radiazione elettromagnetica; ma poiché l'energia di una radiazione viene espressa in termini di lunghezza d'onda, sarà proprio la lunghezza d'onda della radiazione emessa da un elettrone che cade entro un dato atomo a dare una misura della forza con cui esso viene trattenuto al suo interno. L'energia della radiazione aumenta al diminuire della lunghezza d'onda: maggiore è l'energia, minore è la lunghezza d'onda.

Veniamo, ora, alla scoperta di Moseley. Egli era giunto alla conclusione che i metalli (cioè gli elementi più pesanti) producevano raggi X, ciascuno con una lunghezza d'onda caratteristica, che diminuiva con regolarità via via che si procedeva nella tavola periodica. Sembrava dunque che ogni elemento trattenesse i propri elettroni con più forza del precedente: cioè che, procedendo nella tavola periodica, ogni elemento contenesse nella propria regione più interna una carica positiva maggiore.

Partendo dal presupposto che ogni unità di carica positiva corrispondesse alla carica negativa di un elettrone, seguiva che l'atomo di ogni elemento doveva avere un elettrone in più dell'atomo precedente. Il modo più semplice di rappresentarsi il sistema periodico, perciò, consisteva nel supporre che il primo elemento, l'idrogeno, avesse una unità di carica positiva e un elettrone, il secondo elemento, l'elio, 2 cariche positive e 2 elettroni, il terzo, il litio, 3 cariche positive e 3 elettroni; e così via, fino all'uranio, con 92 cariche positive e 92 elettroni. Così si chiarì che il numero atomico di un elemento rappresentava il numero degli elettroni presenti negli atomi integri di tale elemento.

Ancora un passo avanti, e gli scienziati trovarono la ragione per cui la tavola periodica presentava una periodicità. Si arrivò a rendersi conto che la radiazione elettronica di un dato elemento non è necessariamente limitata a un'unica lunghezza d'onda: un elemento può emettere due tre, quattro o anche più lunghezze d'onda differenti.

Questi insiemi di righe spettrali vennero chiamati "serie K", "serie L", "serie M" e così via. I ricercatori giunsero alla conclusione che gli elettroni sono disposti in "gusci" (o "strati") intorno al nucleo dell'atomo, carico positivamente. Gli elettroni del guscio più interno sono trattenuti con forza maggiore, così che occorre più energia per strapparli via. Un elettrone che vada a collocarsi in questo strato emette la radiazione più energetica, cioè avente la lunghezza d'onda minore, e quindi appartenente alla serie K. Gli elettroni dello strato contiguo sono responsabili dell'emissione delle radiazioni della serie L; lo strato ancora successivo produce la serie M, e così via. Di conseguenza, gli strati sono stati chiamati "strato K", "strato L", "strato M", e così di seguito.

Nel 1925, il fisico austriaco Wolfgang Pauli propose il "principio di esclusione", che spiegava la distribuzione degli elettroni entro ogni strato: secondo tale principio, due elettroni non

possono mai avere esattamente gli stessi "numeri quantici". Per questo suo contributo Pauli ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1945.

I GAS NOBILI, O INERTI.

Nel 1916 il chimico americano Gilbert Newton Lewis tentò di interpretare il comportamento chimico e le relazioni tra le proprietà di alcuni tra gli elementi più semplici, in base alla struttura dei loro strati. Tanto per cominciare, trovò abbondanti conferme del fatto che gli elettroni dello strato più interno non possono essere più di due (come del resto previsto dal principio di esclusione di Pauli).

L'idrogeno ha un solo elettrone, il che significa che lo strato più interno è incompleto. La tendenza dell'atomo è a riempire questo strato, il K, cosa ottenibile in svariati modi. Per esempio, due atomi di idrogeno possono mettere in comune i loro elettroni, riuscendo così a completare i rispettivi strati K. Pertanto il gas idrogeno si trova quasi sempre in forma di molecola biatomica. Occorre parecchia energia per separare i due atomi liberando "idrogeno atomico". Irving Langmuir della General Electric Company, che aveva elaborato indipendentemente uno schema analogo a proposito degli elettroni e del comportamento chimico, presentò una dimostrazione pratica della forte tendenza dell'atomo di idrogeno a completare il suo strato di elettroni. Egli realizzò un "cannello all'idrogeno atomico", facendo passare dell'idrogeno attraverso un arco elettrico, che scindeva le molecole in atomi; quando, dopo essere passati attraverso l'arco, gli atomi si ricombinavano, liberavano l'energia che avevano assorbito nello scindersi, portando la temperatura fino a 3400 gradi C!

Nell'elio, l'elemento 2, lo strato K contiene due elettroni; pertanto gli atomi di elio sono stabili e non si combinano con altri atomi.

Quando arriviamo al litio, l'elemento 3, troviamo che 2 dei suoi elettroni riempiono lo strato K, mentre il terzo dà inizio allo strato L. Negli elementi successivi, gli elettroni si aggiungono uno per volta a questo strato: il berillio ha 2 elettroni nello strato L, il boro ne ha 3, il carbonio 4, l'azoto 5, l'ossigeno 6, il fluoro 7 e il neon 8. Come dimostrò Pauli, per lo strato L il limite è costituito da 8 elettroni; pertanto il neon, come l'elio, ha lo strato più esterno completo. Non c'è quindi da stupirsi se anch'esso è un gas inerte, con proprietà analoghe a quelle dell'elio.

Ogni atomo che abbia lo strato esterno incompleto ha la tendenza a entrare in combinazione con altri atomi, in modo tale da rendere completo il proprio strato più esterno. Per esempio, l'atomo di litio è propenso a cedere il suo unico elettrone dello strato L, in modo da restare con lo strato esterno K completo, mentre il fluoro tende a impadronirsi di un elettrone da aggiungere ai suoi sette, in modo da completare lo strato L. È per questo che litio e fluoro hanno un'affinità reciproca; quando si combinano, il litio cede il suo elettrone L al fluoro, completando lo strato L di quest'ultimo. Dato che le cariche positive all'interno degli atomi restano immutate, quando si sottrae un elettrone al litio esso resta con una carica positiva in eccesso, mentre il fluoro, avendo acquistato un elettrone, resta con una carica negativa in più. L'attrazione reciproca fra le due cariche opposte tiene insieme i due ioni. Il composto che ne risulta viene chiamato fluoruro di litio.

Gli elettroni dello strato L, oltre a essere trasferiti, possono anche essere messi in comune. Per esempio, di due atomi di fluoro, ciascuno può mettere uno dei propri elettroni in comune con l'altro atomo, in modo che in totale ogni atomo ha 8 elettroni nello strato L (contando i due elettroni in comune). Analogamente, due atomi di ossigeno metteranno in comune un totale di quattro elettroni per completare i loro strati L; due atomi di azoto ne metteranno in comune un totale di sei. Così il fluoro, l'ossigeno e l'azoto formano tutti molecole biatomiche.

L'atomo del carbonio, che ha nel suo strato L solo quattro elettroni, metterà in comune ciascuno di questi con un diverso atomo di idrogeno, completando così gli strati K dei quattro atomi di idrogeno e a sua volta riempiendo il proprio strato L con la messa in comune dei "loro" elettroni. Si ha così infine una configurazione stabile, la molecola del metano, CH_4.

Analogamente, un atomo di azoto metterà gli elettroni in comune con tre atomi di idrogeno, formando ammoniaca; un atomo di ossigeno metterà gli elettroni in comune con due atomi di idrogeno formando acqua; un atomo di carbonio farà lo stesso con due atomi di ossigeno formando anidride carbonica, e così via. Quasi tutti i composti formati dagli elementi della prima parte della tavola periodica trovano una spiegazione in base a questa tendenza a completare lo strato esterno cedendo o ricevendo elettroni, o mettendoli in comune.

L'elemento successivo al neon, il sodio, ha 11 elettroni, di cui l'undicesimo deve dare inizio a un terzo strato. Segue quindi il magnesio, con due elettroni nello strato M, l'alluminio con tre, il silicio con quattro, il fosforo con cinque, lo zolfo con sei, il cloro con sette e l'argo con otto.

Ora, ogni elemento di questa serie corrisponde a un elemento della serie precedente. L'argo, con i suoi otto elettroni nello strato M, assomiglia al neon (con otto elettroni nello strato L) ed è un gas inerte. Il cloro, avendo sette elettroni nel suo strato esterno, ha proprietà chimiche molto simili a quelle del fluoro. Analogamente, il silicio assomiglia al carbonio; il sodio assomiglia al litio, e così via.

Lo stesso accade in tutta la tavola periodica. Il comportamento chimico di ogni elemento dipende dalla configurazione degli elettroni nel suo strato più esterno; pertanto, tutti gli elementi che hanno, per esempio, un solo elettrone in tale strato reagiranno all'incirca nello stesso modo dal punto di vista chimico. Così, tutti gli elementi della prima colonna della tavola - litio, sodio, potassio, rubidio, cesio e perfino l'elemento radioattivo francio - hanno proprietà chimiche notevolmente simili. Il litio ha 1 elettrone nello strato L, il sodio ne ha 1 nello strato M, il potassio 1 nello strato N, il rubidio 1 nello strato O, il cesio 1 nello strato P e il francio 1 nello strato Q; e ancora, tutti gli elementi con 7 elettroni nello strato esterno - fluoro, cloro, bromo, iodio e astato - si assomigliano. Lo stesso vale per l'ultima colonna della tavola - quella degli elementi con lo strato completo, cioè elio, neon, argo, cripto, xeno e rado.

L'idea elaborata da Lewis e Langmuir funziona ancora assai bene nella sua forma originale quando si tratta di spiegare le varietà più semplici e immediate di comportamento degli elementi. Esistono però comportamenti meno semplici e meno chiari.

Per esempio, ciascuno dei gas inerti (o nobili) - elio, neon, argo, cripto, xeno e rado - ha otto elettroni nello strato esterno (salvo l'elio, che ha due elettroni nel suo unico strato), condizione questa che è la più stabile possibile. Gli atomi di questi elementi hanno una tendenza minima a perdere o ad acquistare elettroni, e quindi a entrare in reazioni chimiche. I gas saranno pertanto inerti, proprietà da cui traggono la loro denominazione.

Tuttavia, una «tendenza minima» non è la stessa cosa che «nessuna tendenza»; ma in genere i chimici si dimenticarono di questa verità, comportandosi come se per i gas inerti fosse assolutamente impossibile formare dei composti. Questo non era vero in generale. Fin dal lontano 1932, il chimico americano Linus Pauling constatò con quanta facilità si potessero sottrarre elettroni da diversi elementi, notando che tutti gli elementi senza eccezione, perfino i gas nobili, possono venir privati di alcuni elettroni. Questa separazione, però, richiede più energia nel caso dei gas inerti che in quello di altri elementi a essi vicini nel sistema periodico.

La quantità di energia necessaria per sottrarre elettroni agli elementi di una data famiglia diminuisce al crescere del peso atomico, e i gas inerti più pesanti, come lo xeno e il rado, non richiedono un'energia eccezionale. In altri termini, non vi è maggior difficoltà a sottrarre un elettrone da un atomo di xeno, per esempio, che da un atomo di ossigeno.

Pauling predisse pertanto che i gas inerti più pesanti avrebbero potuto formare composti chimici con elementi dotati di una particolare tendenza ad accettare elettroni. L'elemento che maggiormente manifesta tale tendenza è il fluoro, e a esso sembrò quindi naturale rivolgersi.

Ora il rado, il gas inerte più pesante, è radioattivo, e disponibile solo in tracce minime. Lo xeno, invece, il gas nobile più pesante dopo il rado, è stabile e si trova nell'atmosfera, benché in piccole quantità. Dunque le migliori possibilità si sarebbero avute cercando di ottenere un composto di xeno e fluoro. Tuttavia, per trent'anni non se ne fece nulla, sia perché lo xeno era costoso e il

fluoro di difficile manipolazione, sia perché i chimici pensavano di aver di meglio da fare che dare la caccia a questa chimera.

Nel 1962, però, il chimico anglo-canadese Neil Bartlett - lavorando con un nuovo composto, l'esafluoruro di platino (PtF6) - lo trovò particolarmente propenso ad acquistare elettroni, quasi quanto il fluoro stesso. Questo composto sottraeva elettroni all'ossigeno, un elemento che è normalmente pronto ad acquistare elettroni piuttosto che a perderli. Se PtF6 poteva strappare elettroni all'ossigeno, poteva strapparli anche allo xeno. Si fece la prova, e si poté annunciare la formazione del primo composto di un gas inerte, il fluoroplatinato di xeno (XePtF6).

Altri chimici si misero subito all'opera, riuscendo a ottenere parecchi composti dello xeno, con il fluoro, con l'ossigeno o con entrambi: il più stabile di tutti era il difluoruro di xeno (XeF2). Si formarono anche un composto del cripto e del fluoro, il tetrafluoruro di cripto (KrF4), e il fluoruro di rado. Si ottennero altresì composti con l'ossigeno, come l'ossitetrafluoruro di xeno (XeOF4), l'acido xenico (H2XeO4) e il perxenato di sodio (Na4XeO6). Il più interessante di tutti era forse il triossido di xeno (Xe2O3), che esplode facilmente ed è pericoloso. I gas nobili di minor peso atomico - argo, neo ed elio - sono meno propensi a mettere in comune i loro elettroni, e, per il momento, continuano a essere inerti, quali che siano gli sforzi dei chimici.

Questi si ripresero ben presto dallo shock iniziale conseguente all'aver scoperto che i gas inerti possono formare dei composti: dopo tutto questi composti rientrano bene nel quadro generale. Di conseguenza, oggi si evita di parlare di gas inerti, preferendo la denominazione alternativa di "gas nobili"; così, si sente parlare di "composti dei gas nobili" e di "chimica dei gas nobili".

(Personalmente ritengo che questo sia un cambiamento in peggio: dopo tutto, i gas rimangono inerti, anche se non in senso assoluto. Il termine nobile, in questo contesto, sta a significare «poco disposto a mescolarsi con il gregge», ed è altrettanto inappropriato di quello di inerte; in più, è poco consono a una società democratica.)

GLI ELEMENTI DELLA SERIE DELLE TERRE RARE.

Oltre a esser stato applicato in modo troppo rigido al caso dei gas inerti, lo schema di Lewis e Langmuir può ben difficilmente essere applicato a parecchi elementi con numero atomico superiore a 20. In particolare è stato necessario perfezionare tale schema, per poter affrontare alcuni complessi problemi che avevano a che fare con le cosiddette "terre rare" - gli elementi dal 57 al 71.

Facciamo un passo indietro: i primi chimici chiamavano "terra" (riecheggiando il concetto greco dell'elemento-terra) qualsiasi sostanza che fosse insolubile in acqua e restasse inalterata se riscaldata. Queste terre comprendevano quelli che oggi chiamiamo ossido di calcio, ossido di magnesio, anidride silicica, ossido ferrico, ossido di alluminio, e così via - composti che in pratica costituiscono circa il 90 per cento della crosta terrestre. L'ossido di magnesio e l'ossido di calcio sono leggermente solubili, e, in soluzione, presentano proprietà "alcaline" (cioè, opposte a quelle degli acidi): per questo furono chiamati "terre alcaline"; quando Humphry Davy, partendo da queste terre, isolò i metalli calcio e magnesio, essi vennero chiamati "metalli alcalino-terrosi". Questa denominazione finì per essere applicata a tutti gli elementi che rientrano nella colonna della tavola periodica che contiene il magnesio e il calcio, cioè al berillio, allo stronzio, al bario e al radio.

I problemi cui accennavo cominciarono nel 1794, quando un chimico finlandese, Johan Gadolin, esaminò una strana roccia che era stata trovata vicino a Ytterby, un paesino della Svezia, e decise che si trattava di una nuova «terra». Gadolin diede a questa «terra rara» il nome di "ittria", da Ytterby. In seguito il chimico tedesco Martin Heinrich Klaproth scoprì che si poteva separare l'ittria in due «terre», una delle quali seguitò a denominare ittria, mentre all'altra diede il nome di "ceria" (dal pianetino scoperto da poco, Cerere). Ma il chimico svedese Carl Gustav Mosander, successivamente, le separò ulteriormente, ottenendo una serie di terre diverse, che si dimostrarono tutte ossidi di elementi nuovi, chiamati "metalli delle terre rare". Nel 1907 ne erano stati identificati quattordici. In ordine di peso atomico crescente, sono:

"lantanio", da una parola greca che significa «nascosto»;
"cerio", da Cerere (il suo ossido era detto «ceria»);
"praseodimio", dal greco «gemello verde», a causa di una riga verde nel suo spettro;
"neodimio", cioè «nuovo gemello»;
"samario", dal minerale samarskite, in cui fu trovato;
"europio", da Europa;
"gadolinio", in onore di Johan Gadolin;
"terbio", da Ytterby;
"disprosio", da una parola greca che significa «difficile da raggiungere»
"olmio", da Stoccolma;
"erbio", da Ytterby;
"tulio", da Thule, il vecchio nome della Scandinavia;
"itterbio", da Ytterby;
"lutezio", da Lutetia, antico nome di Parigi.

In base alle loro proprietà di emissione dei raggi X, vennero assegnati a questi elementi i numeri atomici che vanno dal 57 (lantanio) al 71 (lutezio). Come ho già detto precedentemente, vi era una lacuna al posto 61, ma fu riempita quando dalla fissione dell'uranio si ottenne il prometeo, l'elemento mancante. Con ciò si arrivò a quindici.

Gli elementi delle terre rare non sembravano trovar posto adeguato nella tavola periodica. È stata una bella fortuna che ai tempi di Mendeleev se ne conoscessero con sicurezza soltanto quattro; se si fossero conosciuti tutti, avrebbero potuto creare una tal confusione nella tavola da impedirne l'accettazione. Qualche volta, perfino nella scienza, l'ignoranza è un bene.

Il lantanio, il primo metallo delle terre rare, è in buon accordo con l'elemento posto al di sopra nella tavola, il numero 39, l'ittrio.

(L'ittrio, pur trovandosi negli stessi minerali che contengono le terre rare e pur avendo proprietà analoghe alle loro, non è una terra rara; ciononostante prende il nome da Ytterby, del resto come altri tre elementi - forse un onore eccessivo per un paesino così piccolo.)

La confusione comincia con l'elemento successivo al lantanio - cioè, il cerio - che dovrebbe essere simile a quello che segue l'ittrio - vale a dire, lo zirconio. E invece non gli assomiglia proprio per niente; al contrario, è simile ancora all'ittrio. Lo stesso si può dire a proposito di tutti e quindici gli elementi delle terre rare: assomigliano molto all'ittrio e si assomigliano molto tra loro (anzi, hanno proprietà chimiche così simili che all'inizio non si riusciva a separarli, se non con procedure quanto mai tediose), ma non mostrano affinità con alcun altro elemento che li preceda nella tavola periodica. Dobbiamo saltare tutto il gruppo delle terre rare arrivando fino all'afnio, il numero 72, per trovare un elemento affine allo zirconio, che è successivo all'ittrio.

Sconcertati da questa situazione, i chimici si dovettero rassegnare a raggruppare tutti gli elementi delle terre rare in un'unica casella posta sotto all'ittrio, elencandoli poi singolarmente in una sorta di nota in fondo alla tavola.

GLI ELEMENTI DI TRANSIZIONE.

La soluzione dell'enigma venne infine quando il modello di Lewis e Langmuir della struttura elettronica degli elementi fu arricchito di nuovi particolari.

Nel 1921 C. R. Bury propose che gli elettroni di ciascuno strato non fossero necessariamente limitati a 8. Otto elettroni erano sempre sufficienti a completare lo strato esterno, ma uno strato che non fosse all'esterno avrebbe potuto avere una capacità superiore. Gli strati interni, cioè, avrebbero potuto assorbire più elettroni, ciascuno più del precedente. Per esempio, lo strato K doveva avere una capacità totale di 2 elettroni, lo strato L di 8, lo strato M di 18, lo strato N di 32 e così via con

un aumento dato dalla successione dei quadrati perfetti moltiplicati per 2, e cioè dalla successione: 2 per 1 al quadrato; 2 per 2 al quadrato; 2 per 3 al quadrato; 2 per 4 al quadrato, eccetera.

Questa intuizione fu confermata da uno studio approfondito degli spettri degli elementi. Il fisico danese Niels Henrik David Bohr dimostrò che ogni strato di elettroni era composto di sottostrati che avevano livelli di energia leggermente diversi tra loro. A ogni strato successivo, la separazione dei sottostrati aumentava, così che in breve gli strati si sovrapponevano. Ne conseguiva che il sottostrato più esterno di uno strato interno (per esempio, lo strato M) poteva essere, in realtà, più lontano dal centro (per così dire) del sottostrato più interno dello strato successivo (nell'esempio, lo strato N). Se così stavano le cose, il sottostrato più interno dello strato N poteva riempirsi di elettroni, mentre quello più esterno dello strato M era ancora vuoto.

Un esempio renderà tutto più chiaro. Secondo questa teoria, lo strato M è suddiviso in tre sottostrati, aventi le capacità rispettive di 2, 6 e 10 elettroni, per un totale di 18. Ora l'argo, con i suoi 8 elettroni nello strato M, ha solo due sottostrati interni completi. In effetti, non sarà il terzo sottostrato dello strato M, cioè il più esterno, a ricevere il successivo elettrone durante il processo di costituzione degli elementi, perché tale sottostrato è situato oltre il sottostrato più interno dello strato successivo (N); cioè, nel potassio, l'elemento che segue l'argo, il diciannovesimo elettrone non va a finire nel sottostrato più esterno dello strato M, ma nel sottostrato più interno dello strato N. Il potassio, con 1 elettrone nello strato N, assomiglia al sodio, che ha 1 elettrone nello strato M. L'elemento ancora successivo, cioè il calcio (numero atomico 20), ha 2 elettroni nello strato N e assomiglia al magnesio, che ne ha 2 nello strato M. Ma ora il sottostrato più interno dello strato N, avendo posto per soli 2 elettroni, è pieno; gli ulteriori elettroni possono andare a sistemarsi nel sottostrato più esterno dello strato M, che finora era rimasto libero. Lo scandio (21) dà inizio a questo processo, che è portato a termine dallo zinco (30), nel quale il sottostrato più esterno dello strato M ha finalmente acquisito tutti quanti i suoi 10 elettroni. I 30 elettroni dello zinco sono distribuiti nel modo seguente: 2 nello strato K, 8 nello strato L, 18 nello strato M e 2 nello strato N. A questo punto, gli elettroni possono ricominciare a riempire lo strato N. L'elettrone successivo porta a 3 il numero degli elettroni dello strato N, formando il gallio (31), che assomiglia all'alluminio, con 3 elettroni nello strato M.

Il punto importante è che gli elementi dal 21 al 30, che si sono formati man mano che si riempiva un sottostrato momentaneamente saltato, sono "elementi di transizione". Si tenga presente che il calcio assomiglia al magnesio e il gallio all'alluminio, e che magnesio e alluminio sono elementi contigui, rispettivamente di numero atomico 12 e 13. Ma calcio e gallio non lo sono (numeri 20 e 31 rispettivamente): essi sono separati dagli elementi di transizione, i quali introducono una complicazione nella tavola.

Lo strato N è più capace dello strato M, ed è suddiviso, anziché in tre sottostrati, in quattro, che possono contenere rispettivamente 2, 6, 10 e 14 elettroni. L'elemento 36, il cripto, riempie i due sottostrati più interni dello strato N; qui però interviene il sottostrato più interno dello strato O che si sovrappone, ed esso va completato prima che gli elettroni possano riempire i due sottostrati esterni di N. L'elemento successivo al cripto, il rubidio (37), ha il suo trentasettesimo elettrone nello strato O. Lo stronzio (38) completa il riempimento del primo sottostrato O con due elettroni. Da qui in avanti una nuova serie di elementi di transizione procede a riempire il terzo sottostrato dello strato N, che viene completato con il cadmio (48); ora vien saltato il quarto (e più esterno) sottostrato di N, mentre gli elettroni vanno a riempire il secondo sottostrato di O, e ciò fino allo xeno (54).

Ma il quarto sottostrato di N deve ancora attendere il proprio turno; infatti, a questo punto, i sottostrati si sovrappongono in misura tale che anche lo strato P interpone un sottostrato, che deve essere completato prima dell'ultimo sottostrato di N. Dopo lo xeno vengono il cesio (55) e il bario (56), rispettivamente con 1 e 2 elettroni nello strato P. Non è ancora il turno di N: sorprendentemente, il cinquantasettesimo elettrone va a collocarsi nel terzo sottostrato dello strato

O, creando l'elemento lantanio. Ora, e solo ora, un elettrone entra finalmente nel sottostrato più esterno dello strato N.

Uno dopo l'altro gli elementi delle terre rare aggiungono elettroni nello strato N, finché finalmente arriva a completarlo l'elemento 71, il lutezio. Gli elettroni del lutezio sono disposti nel seguente modo: 2 nello strato K, 8 nello strato L, 18 nello strato M, 32 nello strato N, 9 nello strato O (due sottostrati completi, più 1 elettrone nel sottostrato successivo) e 2 nello strato P (sottostrato più interno completo).

Ora cominciamo finalmente a capire come mai gli elementi delle terre rare e alcuni altri gruppi di elementi di transizione sono così simili. Il fattore decisivo che differenzia gli elementi per quanto riguarda le loro proprietà chimiche è la configurazione degli elettroni dello strato più esterno. Per esempio, il carbonio, che ha quattro elettroni nello strato più esterno, e l'azoto, che ne ha cinque, hanno proprietà del tutto diverse. Al contrario, nelle sequenze in cui gli elettroni sono impegnati a riempire i sottostrati interni, mentre quello più esterno resta immutato, le proprietà variano assai meno. Così il ferro, il cobalto e il nichel (elementi 26, 27 e 28), che hanno tutti la stessa configurazione elettronica nello strato esterno - cioè un sottostrato N reso completo da 2 elettroni - hanno un comportamento chimico molto simile. La differenza fra le loro configurazioni interne (in un sottostrato M) è abbondantemente mascherata dalla loro somiglianza per quanto riguarda gli elettroni più esterni. Ancora di più ciò vale per gli elementi delle terre rare: le loro differenze (nello strato N) sono occultate non da una, bensì da due configurazioni elettroniche più esterne identiche per tutti questi elementi (negli strati O e P). Nessuna meraviglia se questi elementi si assomigliano come gocce d'acqua.

Dal momento che i metalli delle terre rare non hanno molte utilizzazioni, e in più sono molto difficili da separare, i chimici non fecero mai grandi sforzi per riuscirvi, finché non si giunse alla fissione dell'atomo di uranio. A quel punto la cosa acquistò d'improvviso una notevole urgenza, perché le varietà radioattive di alcuni di questi elementi erano tra i principali prodotti della fissione, e, nel progetto che doveva portare alla bomba atomica, era indispensabile separarli e identificarli in modo rapido e sicuro.

Il problema fu risolto in tempi brevi ricorrendo a una tecnica chimica ideata per la prima volta nel 1906 dal botanico russo Michail Semenovic' Tswett, che l'aveva denominata "cromatografia" («scrittura mediante i colori»). Tswett aveva scoperto che era possibile separare i pigmenti delle piante, molto simili dal punto di vista chimico, facendone passare una soluzione attraverso un tubo di vetro pieno di carbonato di calcio. Tswett scioglieva il suo miscuglio di pigmenti vegetali in etere di petrolio e lo versava sul carbonato di calcio, poi vi versava sopra solvente puro: i pigmenti scendevano lentamente attraverso la polvere di carbonato di calcio con velocità differenti, dovute alla loro diversa adesione alla polvere stessa. Il risultato era che essi si separavano formando una serie di bande, ciascuna di colore diverso. Seguitando nell'operazione le sostanze così separate scendevano ciascuna per conto proprio fino al fondo del tubo.

Il mondo scientifico ignorò per anni la scoperta di Tswett, forse perché non era che un botanico, per di più russo, mentre i protagonisti della ricerca sulle tecniche di separazione a quel tempo erano i biochimici tedeschi. Nel 1931, però, uno di costoro, Richard Willstätter, riscoprì il procedimento, e da allora esso entrò nell'uso comune. (Willstatter aveva ricevuto il premio Nobel per la chimica nel 1915 per il suo eccellente lavoro sui pigmenti vegetali; Tswett, per quanto ne so, è rimasto privo di qualsiasi riconoscimento.)

Risultò che la cromatografia attraverso colonne di polvere funzionava pressoché con tutte le miscele - colorate o no. Si è scoperto che l'ossido di alluminio e l'amido vanno meglio del carbonato di calcio per separare le molecole comuni. Quando sono gli ioni a essere separati, si parla di "scambio di ioni"; le prime sostanze usate con successo per questo scopo furono le "zeoliti". Per esempio, si riusciva a eliminare il calcio e il magnesio dalle "acque dure", facendole passare attraverso una colonna di zeoliti, a cui gli ioni di calcio e magnesio aderiscono, venendo sostituiti nella soluzione dagli ioni di sodio originariamente presenti nella zeolite; dal fondo della colonna

gocciola quindi "acqua dolce". È necessario di quando in quando versare sulle zeoliti una soluzione concentrata di cloruro di sodio per reintegrare gli ioni di sodio. Nel 1935, in seguito allo sviluppo delle "resine scambiatrici di ioni", la tecnica fece un ulteriore passo avanti. Si tratta di sostanze sintetiche che possono essere fabbricate in funzione dell'applicazione a cui sono destinate.

Per esempio, certe resine sono in grado di sostituire ioni di idrogeno ad altri ioni positivi, mentre altre sostituiscono ioni ossidrilici a ioni negativi; con una combinazione delle due si possono asportare quasi tutti i sali dall'acqua del mare. Durante la seconda guerra mondiale una riserva di queste resine faceva parte dell'equipaggiamento di sopravvivenza in dotazione alle scialuppe di salvataggio.

Fu il chimico americano Frank Harold Spedding che applicò la cromatografia a scambio ionico alla separazione delle terre rare, trovando che queste uscivano dalla colonna dove avveniva lo scambio degli ioni in ordine di numero atomico decrescente, il che permetteva non solo di separarle rapidamente, ma anche di identificarle. In effetti la scoperta del prometeo, l'elemento mancante numero 61, venne confermata in tal modo dalle piccolissime quantità di tale terra rara trovate tra i prodotti di fissione.

Grazie alla cromatografia, le terre rare oggi si possono ottenere allo stato puro a chili e anche a tonnellate. Risulta infatti che le terre rare non sono particolarmente rare: quelle meno abbondanti (salvo il prometeo) sono comunque più comuni dell'oro e dell'argento, mentre quelle più abbondanti - lantanio, cerio e neodimio - sono più diffuse del piombo. Complessivamente, i metalli delle terre rare sono presenti nella crosta terrestre in percentuale maggiore del rame e dello stagno presi insieme. Per tale ragione gli scienziati hanno sostanzialmente abbandonato la denominazione di "terre rare", e oggi chiamano gli elementi di questa serie "lantanidi", dal nome del primo di essi.

Certamente questi metalli non sono stati molto usati in passato, ma oggi la facilità con cui è possibile separarli ne ha moltiplicate le applicazioni, e negli anni settanta ne sono stati usati circa 11 milioni di chilogrammi all'anno. Le pietrine per accendisigari sono fatte per tre quarti di mischmetal, una miscela formata in prevalenza di cerio, lantanio e neodimio. Una miscela di ossidi viene usata per brillantare il vetro, al quale inoltre vengono aggiunti altri ossidi per ottenere alcune proprietà molto apprezzate. Altre miscele di ossidi di europio e ittrio sono usate come luminofori sensibili al rosso nella televisione a colori, e così via.

GLI ATTINIDI.

Una migliore conoscenza dei lantanidi non solo ha consentito applicazioni pratiche, ma ha anche offerto una chiave per capire la chimica degli ultimi elementi della tavola periodica, compresi quelli sintetici.

La serie degli elementi pesanti in questione comincia con l'attinio, il numero 89, situato sotto al lantanio. L'attinio ha 2 elettroni nello strato Q, così come il lantanio ne ha 2 nello strato P.

L'ottantanovesimo e ultimo elettrone dell'attinio fa parte dello strato P, proprio come il cinquantasettesimo e ultimo del lantanio fa parte dello strato O. Ora la questione è: gli elementi successivi all'attinio continuano ad aggiungere elettroni nello strato P, restando normali elementi di transizione, oppure seguono l'andamento degli elementi successivi al lantanio, in cui gli elettroni vanno a completare il sottostrato più interno saltato? In quest'ultimo caso, l'attinio potrebbe dar inizio a una nuova serie di metalli delle terre rare, da chiamarsi "attinidi".

Gli elementi naturali della serie degli attinidi sono l'attinio, il torio, il protoattinio e l'uranio, che prima del 1940 non erano stati studiati a fondo. Il poco che si sapeva sulla loro chimica faceva pensare che fossero normali elementi di transizione. Ma allorché si aggiunsero all'elenco gli elementi artificiali nettunio e plutonio, che stimolarono uno studio approfondito, si scoprì che questi presentavano una forte somiglianza chimica con l'uranio. Per tale ragione Glenn Seaborg propose che gli elementi pesanti seguissero effettivamente l'andamento dei lantanidi, riempiendo il quarto sottostrato dello strato O. Con il laurenzio tale sottostrato è completato, e i quindici attinidi

sono in perfetta analogia con i quindici lantanidi. Una conferma importante è che la cromatografia basata sullo scambio di ioni separa gli attinidi esattamente nello stesso modo in cui separa i lantanidi.

L'elemento 104 (il rutherfordio) e l'elemento 105 (lo hahnio) sono "transattinidi" e sicuramente vanno collocati sotto l'afnio e il tantalio, i due elementi che seguono i lantanidi.

I GAS.

Fin dai primordi della chimica si sapeva che molte sostanze possono esistere sotto forma gassosa, liquida o solida, in dipendenza dalla temperatura. L'acqua ne è l'esempio più comune: sufficientemente raffreddata, diventa ghiaccio solido; sufficientemente riscaldata, diventa vapore. Van Helmont, che per primo usò il termine "gas", stabilì una differenza tra sostanze che sono gas alle temperature ordinarie, come l'anidride carbonica, e altre che lo sono solo a temperatura elevata, come l'acqua. Van Helmont chiamò queste ultime "vapori", e anche oggi parliamo di "vapor d'acqua" e non di "gas d'acqua".

Lo studio dei gas, o vapori, seguitò ad affascinare i chimici, anche perché tali sostanze si prestavano a un'analisi quantitativa. Le leggi che governano il comportamento dei gas sono risultate più facili da comprendere di quelle che governano il comportamento di liquidi e solidi.

LIQUEFAZIONE.

Nel 1787 il fisico francese Jacques Alexandre César Charles scoprì che, quando si raffredda un gas, ogni grado di diminuzione della temperatura provoca una contrazione del volume di circa 1 su 273 del volume del gas a 0 gradi C, e che inversamente ogni grado di aumento della temperatura causa un'espansione di 1 su 273. Mentre quest'ultima non sollevava difficoltà teoriche, la contrazione provocata dal raffreddamento poneva un problema: seguitando a raffreddare fino a meno 273 gradi C il volume del gas avrebbe dovuto ridursi a zero!

Questo paradosso non turbava particolarmente i sonni dei chimici, perché questi erano sicuri che la "legge di Charles" (come viene chiamata oggi) non poteva valere indefinitamente: i gas, infatti, a un certo punto si sarebbero condensati dando origine a liquidi, che non si contraggono in modo così drastico come i gas con l'abbassamento della temperatura.

I chimici, però, non avevano ancora modo di raggiungere temperature così basse da vedere cosa accadeva veramente.

Lo sviluppo della teoria atomica, che raffigurava i gas come insiemi di molecole, presentò la situazione in termini nuovi. Era ormai chiaro che il volume dipendeva dalla velocità delle molecole. Più era alta la temperatura, più veloci erano le molecole, maggiore lo spazio da esse richiesto, e pertanto maggiore il volume. Inversamente, minore era la temperatura, più lento era il moto delle molecole, minore lo spazio necessario per tale moto, e quindi minore il volume. Negli anni successivi al 1860 il fisico inglese William Thomson, da poco insignito del titolo di pari col nome di Lord Kelvin, giunse alla conclusione che fosse il contenuto energetico medio delle molecole a diminuire di 1 su 273 per ogni grado di diminuzione della temperatura.

Se il volume non poteva ridursi a zero, l'energia, invece, lo poteva. Thomson sosteneva che, a meno 273 gradi C, l'energia delle molecole si sarebbe ridotta a zero, e che quindi meno 273 gradi C doveva rappresentare la minima temperatura possibile. Questa temperatura doveva costituire lo zero assoluto, o, come si dice, lo "zero Kelvin". (Oggi misurazioni più accurate l'hanno fissato a meno 273,16 gradi C.) Su questa scala assoluta, il punto di fusione del ghiaccio è a 273 gradi K.

Questa concezione confermava la previsione che tutti i gas si sarebbero liquefatti avvicinandosi allo zero assoluto. Disponendo di energia sempre minore, le molecole di un gas avrebbero occupato uno spazio tanto ridotto da finire per entrare in contatto reciproco, ammassandosi l'una sull'altra. In altri termini, sarebbero diventate dei liquidi: infatti, si possono

spiegare le proprietà dei liquidi supponendo che siano costituiti da molecole in contatto, che però avrebbero ancora abbastanza energia da poter scorrere liberamente l'una sopra, o sotto, o accanto, all'altra. Per questa ragione i liquidi possono essere versati in un contenitore, di cui assumono facilmente la forma.

Continuando a diminuire la temperatura e quindi l'energia, le molecole finiscono per non aver più nemmeno l'energia necessaria per scorrere l'una sull'altra, e si limitano a occupare una posizione fissa, intorno a cui possono vibrare, senza però potersene scostare. In altri termini, il liquido è congelato, diventando un solido. Per Kelvin era dunque chiaro che, avvicinandosi allo zero assoluto, tutti i gas non solo si sarebbero liquefatti, ma si sarebbero anche congelati.

Naturalmente i chimici ora desideravano dimostrare l'esattezza della previsione di Kelvin, facendo abbassare la temperatura fino al punto in cui tutti i gas dapprima si sarebbero liquefatti e poi, via via che ci si avvicinava allo zero assoluto, congelati. (Ogni orizzonte lontano esercita un fascino che spinge a conquistarlo.)

Gli scienziati avevano iniziato a esplorare i confini del freddo anche prima che Kelvin ne definisse il limite estremo. Michael Faraday aveva scoperto che, anche alle temperature ordinarie, si potevano liquefare alcuni gas, sottoponendoli a pressione. A tale scopo aveva adoperato un resistente tubo di vetro piegato a forma di boomerang e vi aveva posto, nell'estremo chiuso, una sostanza che producesse il gas voluto.

Poi aveva sigillato l'estremo aperto. Aveva collocato in acqua molto calda l'estremo del tubo contenente il materiale solido, liberando così quantità sempre maggiori del gas; ma poiché questo era chiuso nel tubo, si creava una pressione sempre maggiore. Contemporaneamente, Faraday aveva posto l'altro estremo del tubo entro un recipiente contenente ghiaccio tritato. In quel punto il gas, trovandosi sottoposto tanto a un'alta pressione quanto a una bassa temperatura, si sarebbe liquefatto. Nel 1823 Faraday liquefece il gas cloro con questo sistema. La temperatura di liquefazione normale del cloro è meno 34,5 gradi C (238,7 gradi K).

Nel 1835, un chimico francese, C. S. A. Thilorier, usò il metodo di Faraday per ottenere sotto pressione anidride carbonica liquida, ricorrendo a cilindri metallici, capaci di sopportare pressioni maggiori dei tubi di vetro. Egli riuscì a preparare una considerevole quantità di anidride carbonica liquida e poi la fece uscire dal tubo attraverso una piccola valvola.

Naturalmente in queste condizioni l'anidride carbonica liquida esposta a temperature normali sarebbe rapidamente evaporata. Quando un liquido evapora, le sue molecole si separano dalle molecole circostanti e cominciano a muoversi liberamente. Le molecole di un liquido si attraggono reciprocamente, e per liberarsi da tale attrazione occorre loro energia. Se l'evaporazione è rapida, non c'è il tempo perché entri nel sistema energia sufficiente (sotto forma di calore), e l'unica fonte di energia che resta per far proseguire l'evaporazione è il liquido stesso. Pertanto, quando un liquido evapora molto rapidamente, la temperatura del liquido rimanente cala velocemente. (Noi stessi sperimentiamo questo fenomeno, in quanto il corpo umano traspira sempre leggermente, e l'evaporazione della sottile pellicola di acqua sulla nostra pelle ci mantiene freschi, sottraendo calore alla pelle stessa. Più fa caldo, e più dobbiamo traspirare; e se l'aria è tanto umida da impedire l'evaporazione, il sudore si accumula sul nostro corpo, facendoci sentire molto a disagio. Anche l'esercizio fisico, moltiplicando le reazioni che producono calore nel nostro corpo, fa aumentare la traspirazione, e se l'umidità atmosferica è alta, anche in questo caso ci sentiamo molto a disagio.)

Per tornare a Thilorier, quando questi fece evaporare l'anidride carbonica liquida, notò una rapida caduta della temperatura del liquido residuo, via via che procedeva l'evaporazione, finché l'anidride carbonica congelò. Per la prima volta, si era ottenuta anidride carbonica solida.

L'anidride carbonica liquida è stabile solo sotto pressione.

L'anidride carbonica solida, sottoposta a pressioni ordinarie, "sublima", cioè evapora direttamente senza prima liquefarsi. Il punto di sublimazione dell'anidride carbonica solida è meno 78,5 gradi C (194,7 gradi K).

L'anidride carbonica solida ha l'aspetto del ghiaccio opaco, anche se è molto più fredda, e, poiché non dà origine a un liquido, viene chiamata "ghiaccio secco". Se ne producono circa 400 mila tonnellate all'anno, la maggior parte usata per la conservazione del cibo tramite refrigerazione.

La possibilità di raffreddare mediante l'evaporazione ha rivoluzionato la vita umana. Prima del diciannovesimo secolo, per conservare il cibo si poteva ricorrere al ghiaccio, se era disponibile, creandone delle riserve d'inverno e conservandolo mediante l'isolamento durante l'estate, oppure portandolo a valle dai monti. A dir poco si trattava di un procedimento difficile e macchinoso, e in genere la gente si rassegnava al caldo durante l'estate (o addirittura durante tutto l'anno).

Già nel 1755, il chimico scozzese William Cullen aveva prodotto del ghiaccio facendo il vuoto al di sopra di una certa quantità di acqua, e accelerandone quindi l'evaporazione: in tal modo l'acqua si era raffreddata raggiungendo il punto di congelamento. Questo ghiaccio, però, non poteva competere con il ghiaccio naturale, né il processo poteva essere applicato indirettamente alla semplice refrigerazione del cibo, perché il ghiaccio che si sarebbe formato avrebbe otturato le tubature.

Oggigiorno si liquefa con un compressore un gas appropriato, portandolo poi a temperatura ambiente; quindi lo si fa circolare in tubi avvolti a spirale attorno al recipiente che contiene gli alimenti; evaporando, esso sottrae calore a tale recipiente. Il gas che si forma viene nuovamente liquefatto dal compressore, raffreddato e rimesso in circolazione. Il processo è continuo, e il calore viene pompato all'esterno, finendo nell'atmosfera. Questo è il "frigorifero", che ha sostituito la "ghiacciaia" di una volta.

Nel 1834, un inventore americano, Jacob Perkins, brevettò in Gran Bretagna l'uso dell'etere come refrigerante. Allo stesso scopo furono usate anche altre sostanze, come l'ammoniaca e l'anidride solforosa, ma tutte presentavano l'inconveniente di essere tossiche o infiammabili. Poi, nel 1930, il chimico americano Thomas Midgley scoprì il diclorodifluorometano (CF_2Cl_2), più noto con il nome commerciale di "freon". Esso non è tossico (come dimostrò Midgley riempiendosene in pubblico i polmoni), non è infiammabile ed è perfettamente adatto all'uso. Con il freon la refrigerazione domestica divenne d'uso comune ovunque.

(Anche se il freon e altri "fluorocarboni" si sono sempre dimostrati del tutto innocui per gli esseri umani, negli anni settanta sono sorti dei dubbi circa il loro effetto sull'ozonosfera, come abbiamo detto nel capitolo precedente.)

Applicando in misura moderata la refrigerazione in spazi ampi si ha il "condizionamento dell'aria", così chiamato perché l'aria stessa viene anche condizionata - cioè filtrata e deumidificata. La prima unità di condizionamento dell'aria fu progettata nel 1902 dall'inventore americano Willis Haviland Carrier; dopo la seconda guerra mondiale, il condizionamento degli ambienti è diventato quasi universale nelle principali città americane.

Ma ritorniamo ancora una volta a Thilorier: egli aggiunse anidride carbonica solida a "etere etilico", un liquido oggi noto soprattutto come anestetico, che bolle a bassa temperatura ed evapora rapidamente. Si riuscì così a ottenere una temperatura di meno 110 gradi C, grazie all'azione combinata dell'etere etilico e della sublimazione dell'anidride carbonica solida.

Nel 1845, Faraday ritornò sul problema della liquefazione dei gas sotto l'effetto combinato delle basse temperature e delle alte pressioni: questa volta usò anidride carbonica solida ed etere etilico come miscela frigorifera. Nonostante questa miscela e l'uso di pressioni ancora superiori, sei gas resistevano a ogni tentativo di liquefazione: erano l'idrogeno, l'ossigeno, l'azoto, il monossido di carbonio, l'ossido di azoto e il metano. Faraday li chiamò "gas permanenti". All'elenco possiamo aggiungere altri cinque gas di cui Faraday non sapeva niente. Uno di questi era il fluoro, gli altri quattro sono i gas nobili: elio, neon, argo e cripto.

Nel 1869, il fisico irlandese Thomas Andrews concluse dai suoi esperimenti che ogni gas ha una temperatura critica al di sopra della quale non può essere liquefatto, qualunque sia la pressione. In seguito questa ipotesi trovò una solida base teorica per merito di un fisico olandese, Johannes Diderik Van der Waals, che per questa ragione ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1910.

Pertanto, per liquefare un gas si doveva prima di tutto esser certi di operare al di sotto della temperatura critica, se non si voleva buttar via il proprio tempo. Furono fatti vari tentativi di raggiungere temperature ancora inferiori per aver ragione dei gas più ostinati. Un metodo "a cascata" - abbassare la temperatura a passi successivi - risolse il problema: dapprima si fece evaporare dell'anidride solforosa liquida per liquefare l'anidride carbonica; poi si usò quest'ultima per liquefare un gas più resistente; e così via. Nel 1877, il fisico svizzero Raoul Pictet riuscì finalmente a liquefare l'ossigeno, a una temperatura di meno 140 gradi C (133 gradi K) e alla pressione di 500 atmosfere. Il fisico francese Louis Paul Cailletet, all'incirca nello stesso periodo, liquefece non solo l'ossigeno, ma anche l'azoto e il monossido di carbonio. Questi liquidi, naturalmente, permisero immediatamente di ottenere temperature ancora inferiori. Si trovò che la temperatura di liquefazione dell'ossigeno alla pressione atmosferica normale è meno 183 gradi C (90 gradi K); quella del monossido di carbonio, meno 190 gradi C (83 gradi K); quella dell'azoto, meno 195 gradi C (78 gradi K).

Nel 1895, l'ingegnere chimico inglese William Hampson e il fisico tedesco Karl von Linde escogitarono indipendentemente una tecnica per liquefare l'aria su vasta scala. L'aria veniva prima compressa e raffreddata riportandola a temperatura ordinaria, poi la si faceva espandere, ottenendo un notevole abbassamento della temperatura. Si usava ora questa aria fredda per immergervi un contenitore di aria compressa, raffreddandolo; solo allora si faceva espandere l'aria compressa del contenitore, che diventava ancora più fredda; ripetendo più volte queste operazioni, si faceva raffreddare l'aria sempre più, fino alla liquefazione.

L'aria liquida, ottenuta così in abbondanza e a costi ragionevoli, poteva facilmente essere separata in ossigeno e azoto liquidi.

L'ossigeno poteva essere usato per le saldature e per scopi medici; l'azoto in quelle circostanze in cui era utile la sua inerzia, per esempio per riempire i bulbi delle lampadine a incandescenza: in tal modo i filamenti portati al calor bianco, e soggetti a rottura a causa della lenta evaporazione del metallo, duravano di più che in bulbi in cui fosse stato fatto il vuoto. L'aria liquida veniva usata anche per ricavarne argo e altri gas nobili.

L'idrogeno resistette a tutti i tentativi di liquefazione fino al 1900. Fu allora che il chimico scozzese James Dewar riuscì in tale impresa, ricorrendo a uno stratagemma del tutto nuovo. Lord Kelvin e il fisico inglese James Prescott Joule avevano mostrato che un gas può essere raffreddato semplicemente facendolo espandere e impedendo al calore di penetrarvi dall'esterno, purché la temperatura iniziale sia abbastanza bassa. Dewar raffreddò quindi idrogeno compresso a una temperatura di meno 200 gradi C in un recipiente immerso in azoto liquido, fece espandere e ulteriormente raffreddare questo idrogeno superfreddo e ripeté più volte il procedimento, riportando ciclicamente al punto di partenza l'idrogeno tramite dei tubi.

L'idrogeno compresso, sottoposto a questo "effetto Joule-Thomson", diventò alla fine liquido a una temperatura di circa meno 240 gradi C (33 gradi K). Dewar riuscì a ottenere idrogeno solido, a temperature ancora inferiori.

Per conservare questi liquidi a bassissima temperatura, Dewar escogitò degli speciali vasi rivestiti d'argento, a doppia parete, nella cui intercapedine veniva fatto il vuoto; il calore poteva penetrare o sfuggire attraverso il vuoto solo mediante il processo di irraggiamento, un processo relativamente lento; ma il rivestimento d'argento rifletteva la radiazione in entrata (e anche quella in uscita, eventualmente). Questi "vasi Dewar" sono gli antenati diretti del familiare thermos.

IL CARBURANTE PER I RAZZI.

Con l'avvento dei razzi, i gas liquefatti acquistarono improvvisamente un'importanza del tutto nuova. I razzi hanno bisogno di reazioni chimiche rapidissime, che forniscano grandi quantità di energia. Il tipo di carburante più idoneo è una combinazione di un combustibile liquido, come l'alcool o il cherosene, con ossigeno liquido; l'ossigeno (o un ossidante equivalente) deve esser

presente comunque nel razzo, perché esso, abbandonando l'atmosfera, resta privo di qualsiasi fonte naturale di ossigeno. In più, tale ossigeno deve essere sotto forma liquida, perché i liquidi hanno densità maggiore dei gas e quindi possono occupare uno spazio minore. Di conseguenza la missilistica ha creato una forte richiesta di ossigeno liquido.

Il rendimento di una miscela di combustibile e di ossidante è misurato da una grandezza nota come "impulso specifico": esso rappresenta la spinta, espressa in chilogrammi, prodotta dalla combustione di 1 chilogrammo di miscela combustibile-ossidante in 1 secondo. Per una miscela di cherosene e ossigeno l'impulso specifico è pari a 242. Dato che il carico utile trasportabile da un razzo dipende dall'impulso specifico, sono state ricercate assiduamente combinazioni più efficienti. Da questo punto di vista, il combustibile liquido migliore che si conosca è l'idrogeno liquido. Combinato con ossigeno liquido, può fornire un impulso specifico pari a 350 circa. Se al posto dell'ossigeno si potessero usare ozono liquido o fluoro liquido, l'impulso specifico potrebbe arrivare perfino a 370 circa.

Alcuni metalli leggeri, come il litio, il boro, il magnesio, l'alluminio e, in particolare, il berillio, combinandosi con l'ossigeno liberano più energia di quanto non faccia lo stesso idrogeno. Talune di queste sostanze sono rare, però, e tutte comportano difficoltà tecniche nella combustione - difficoltà che hanno a che fare con il fumo, i depositi di ossidi e così via.

Esistono inoltre combustibili solidi che contengono anche l'ossidante (come la polvere da sparo, che è stato il primo propellente per razzi). Questi combustibili vengono chiamati "monopropellenti", perché possono fare a meno di un ossidante a parte, costituendo essi stessi l'unico propellente necessario. Quei combustibili che invece richiedono anche l'ossidante sono chiamati "bipropellenti". I monopropellenti, pur essendo facili da immagazzinare e maneggiare e bruciando in modo rapido ma controllato, hanno l'inconveniente che il loro impulso specifico è assai inferiore a quello dei bipropellenti.

Un'altra possibilità è offerta dall'idrogeno atomico, quello utilizzato da Langmuir nella sua fiamma ossidrica. Si è calcolato che, con un motore a razzo funzionante in base alla ricombinazione degli atomi di idrogeno in molecole, l'idrogeno atomico potrebbe sviluppare un impulso specifico superiore a 1300. Il problema principale sta nel suo immagazzinamento. Fino a oggi la soluzione migliore sembra quella di raffreddare molto rapidamente e drasticamente gli atomi liberi subito dopo la loro formazione. Ricerche effettuate al National Bureau of Standards sembrano mostrare che gli atomi di idrogeno libero si conservano meglio se intrappolati in un materiale solido a temperature estremamente basse, ad esempio in ossigeno o in argo congelati. Se potessimo dare il via al riscaldamento e all'evaporazione dei gas congelati semplicemente premendo un pulsante, gli atomi di idrogeno sarebbero liberati e si ricombinerebbero. Se questo solido potesse contenere anche solo per il 10 per cento del suo peso idrogeno atomico, disporremmo di un combustibile nettamente superiore a tutti quelli in uso; ma, naturalmente, occorrerebbe una temperatura davvero bassissima - considerevolmente inferiore a quella dell'idrogeno liquido. Questi solidi dovrebbero essere tenuti a circa meno 272 gradi C, cioè ad appena 1 grado sopra lo zero assoluto.

Esiste una possibilità completamente diversa, consistente nel proiettare all'indietro della combustione fasci di ioni (anziché i gas di scarico del carburante). I singoli ioni, di massa minima, produrrebbero impulsi di piccola entità, che tuttavia potrebbero durare per lunghi periodi. Una nave spaziale messa in orbita mediante la spinta, intensa ma di breve durata, del combustibile chimico, potrebbe in seguito, muovendosi nello spazio praticamente privo di attriti, accelerare lentamente grazie all'impulso prolungato degli ioni, fino a raggiungere quasi la velocità della luce. Il materiale più adatto per questa propulsione ionica è il cesio, la sostanza in cui si può indurre più facilmente la perdita di elettroni, con la formazione di ioni; si potrebbero poi accelerare tali ioni di cesio con un campo elettrico, sparandoli verso l'esterno attraverso un ugello del razzo.

SUPERCONDUTTORI E SUPERFLUIDI.

Ritorniamo ora al mondo delle basse temperature. Neppure la liquefazione e la solidificazione dell'idrogeno rappresentarono la vittoria finale. All'epoca in cui si ebbe ragione dell'idrogeno, erano stati scoperti i gas inerti, il più leggero dei quali, l'elio, opponeva una resistenza ostinata alla liquefazione, anche alle temperature più basse allora raggiungibili. Poi, nel 1908, il fisico olandese Heike Kammerlingh Onnes riuscì infine ad aver la meglio sull'elio. Egli spinse ancora oltre il metodo di Dewar. Usando idrogeno liquido, raffreddò l'elio sotto pressione fino a circa meno 255 gradi C (18 gradi K), poi lo fece espandere perché si raffreddasse ulteriormente; in tal modo riuscì a liquefarlo. Quindi, facendo evaporare l'elio liquido, scese fino alla temperatura a cui lo si può liquefare alla pressione atmosferica normale (4,2 gradi K), una temperatura a cui "tutte" le altre sostanze sono solide, e raggiunse addirittura la temperatura di 0,7 gradi K. Per il suo lavoro sulle basse temperature, Onnes ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1913. (Oggi la liquefazione dell'elio non è più un problema: nel 1947, il chimico americano Samuel Cornette Collins inventò il "criostato", una macchina che, alternando compressioni a espansioni, arriva a produrre fino a 9 litri di elio liquido all'ora.)

Onnes fece però assai più che raggiungere un nuovo record nelle basse temperature: fu il primo a mostrare che la materia in quelle condizioni esibisce proprietà uniche. Una di tali proprietà è lo strano fenomeno detto "superconduttività". Nel 1911, Onnes studiava sperimentalmente la resistenza elettrica del mercurio alle basse temperature; in generale ci si aspettava che tale resistenza diminuisse gradualmente al diminuire della temperatura, perché, sottraendo calore, le normali vibrazioni degli atomi del metallo si sarebbero ridotte. Ma a 4,12 gradi K la resistenza elettrica del mercurio all'improvviso scomparve completamente! Una corrente elettrica vi scorreva attraverso senza perdere affatto di intensità.

Ben presto si scoprì che si potevano rendere superconduttivi anche altri metalli. Il piombo, per esempio, diventava superconduttore a 7,22 gradi K. Una corrente elettrica di parecchie centinaia di ampère, fatta circolare in un anello di piombo mantenuto a tale temperatura per mezzo di elio liquido, seguitò a circolare nell'anello per due anni e mezzo, senza che si potesse assolutamente notare un calo della sua intensità.

Più si abbassavano le temperature, più numerosi erano i metalli che andavano ad aggiungersi all'elenco dei superconduttori. Lo stagno diventava superconduttore a 3,73 gradi K; l'alluminio a 1,20 gradi K; l'uranio a 0,8 gradi K; il titanio a 0,53 gradi K; l'afnio a 0,35 gradi K. (Oggi si conoscono 1400 tra elementi e leghe diversi che presentano la superconduttività.) Ma ferro, nichel, rame, oro, sodio e potassio devono avere temperature di transizione ancora più basse - o forse non possono essere resi superconduttori - perché non hanno ancora mostrato tale comportamento alle temperature più basse finora raggiunte. Il punto di transizione più alto trovato per un elemento metallico è quello del tecnezio, che diventa superconduttore a temperature inferiori a 11,2 gradi K.

Un liquido con bassa temperatura di ebollizione può facilmente mantenere a tale temperatura le sostanze in esso immerse: per raggiungere temperature ancora inferiori, si deve ricorrere all'aiuto di un liquido con un punto di ebollizione ancora più basso. L'idrogeno liquido bolle a 20,4 gradi K, e sarebbe della massima utilità trovare un superconduttore con una temperatura di transizione così alta: solo allora si potrebbe studiare la superconduttività in sistemi raffreddati con idrogeno liquido. In mancanza di ciò, si deve ricorrere all'uso dell'unico liquido che bolla a temperatura inferiore, l'elio liquido - assai più raro, più costoso e più difficile da manipolare. Alcune leghe, particolarmente quelle che contengono il metallo niobio, hanno temperature di transizione superiori a quelle di qualsiasi metallo puro. Infine, nel 1968, si è trovata una lega di niobio, alluminio e germanio che restava superconduttiva a 21 gradi K. Diventava così possibile - ma a malapena - ottenere la superconduttività alla temperatura dell'idrogeno liquido.

Un'utile applicazione della superconduttività si presenta immediatamente in relazione al magnetismo. Facendo passare una corrente elettrica in una bobina avvolta intorno a un nucleo di ferro si ottiene un intenso campo magnetico: maggiore è l'intensità della corrente, maggiore è anche

quella del campo. Purtroppo, con il crescere dell'intensità della corrente, cresce anche il calore prodotto in condizioni ordinarie, il che pone limiti insuperabili. In un superconduttore, invece, l'elettricità scorre senza produrre calore; sembrerebbe quindi possibile immettere sempre più corrente elettrica nella bobina, producendo "elettromagneti" di intensità senza precedenti, e ciò spendendo solo una frazione dell'energia necessaria in condizioni ordinarie. Vi è, però, un ostacolo.

La superconduttività implica infatti un'altra proprietà, che riguarda il magnetismo. Quando una sostanza diventa superconduttiva, diventa anche perfettamente "diamagnetica": cioè, essa esclude le linee di forza di un campo magnetico. Questo fenomeno fu scoperto nel 1933 dal fisico tedesco Walther Meissner, ed è chiamato "effetto Meissner".

Tuttavia, se il campo magnetico è sufficientemente intenso, si può annullare la superconduttività di una sostanza e con essa ogni speranza di supermagnetismo, anche a temperature assai al di sotto del punto di transizione. È un po' come se, una volta raggiunta la sufficiente concentrazione di linee di forza, alcune di esse riuscissero a penetrare nella sostanza; allora, va persa anche la superconduttività.

Si è cercato di trovare sostanze superconduttive capaci di tollerare intensi campi magnetici. Esiste, per esempio, una lega stagno-niobio che ha l'elevata temperatura di transizione di 18 gradi K, e riesce a reggere a un campo magnetico di 250 mila gauss, il che è davvero molto. Questo fatto fu scoperto nel 1954, ma fu solo nel 1960 che si svilupparono tecniche capaci di ottenere dei fili conduttori da questa lega, ordinariamente fragile. Ancora meglio funziona un composto di vanadio e gallio, con il quale sono stati costruiti elettromagneti superconduttori che raggiungono l'intensità di 500 mila gauss.

Un altro sorprendente fenomeno proprio delle basse temperature è stato scoperto nello stesso elio: si tratta della "superfluidità".

L'elio è l'unica sostanza nota che non congela neppure allo zero assoluto. Anche allo zero assoluto, resta un piccolo contenuto di energia irriducibile, che non si può estrarre (pertanto il contenuto energetico è «zero» a tutti gli effetti pratici), ma che tuttavia è sufficiente per mantenere reciprocamente liberi gli atomi, estremamente «poco viscosi» dell'elio, che pertanto resta liquido. In realtà, nel 1905, il fisico tedesco Hermann Walther Nernst aveva dimostrato che non è l'energia di un corpo che si riduce a zero allo zero assoluto, bensì una proprietà a essa strettamente correlata, l'"entropia"; per questo lavoro Nernst ricevette nel 1920 il premio Nobel per la chimica. Non intendo comunque affermare che l'elio solido non possa esistere in nessuna condizione: nel 1926 esso fu prodotto a temperature inferiori a 1 gradi K, con una pressione di circa 25 atmosfere.

Nel 1935, Willem Hendrik Keesom, che era riuscito a ottenere la solidificazione dell'elio, lavorando con la sorella A. P. Keesom nel laboratorio di Onnes a Leida, scoprì che l'elio liquido a temperature inferiori a 2,2 gradi K conduce il calore quasi perfettamente. Lo conduce così rapidamente - alla velocità del suono - che tutte le parti dell'elio hanno sempre la stessa temperatura. L'elio non può bollire: infatti, in tutti i liquidi ordinari, l'ebollizione è dovuta al formarsi di bolle di vapore in zone circoscritte particolarmente calde; ma non è possibile che nell'elio liquido si formino zone particolarmente calde (sempre che si possa parlare di «caldo» in un liquido sotto i 2 gradi K). Quando esso evapora, semplicemente la parte superiore del liquido scivola via senza turbolenze come se si staccasse, per così dire, a strati.

Il fisico russo Pëtr Leonidovic' Kapitza proseguì nello studio di questa proprietà e scoprì che la ragione per cui l'elio conduce tanto bene il calore è che esso è eccezionalmente fluido e trasferisce il calore da un punto all'altro della propria massa quasi istantaneamente, con una velocità almeno 200 volte maggiore di quella del rame, il miglior conduttore del calore dopo l'elio. Esso fluisce ancora meglio di un gas, avendo una viscosità pari a un millesimo di quella dell'idrogeno gassoso; sottilissime fessure da cui un gas non filtra lasciano invece fuoriuscire l'elio. Inoltre, il liquido superfluido forma una pellicola sul vetro, scorrendovi sopra con la stessa velocità con cui passa per un foro. Se si pone un contenitore aperto pieno di elio liquido in un contenitore più

grande, riempito fino a un livello inferiore, il liquido risale lungo la parete di vetro del primo contenitore, trabocca nel contenitore esterno, finché i livelli nei due contenitori sono uguali.

L'elio è l'unica sostanza che presenta il fenomeno della superfluidità. Anzi, l'elio superfluido si comporta in modo talmente differente da quello dell'elio stesso al di sopra dei 2,2 gradi K, che gli si è dato un nome apposito, "elio secondo", mentre si è chiamato "elio primo" lo stesso elemento, liquido, al di sopra di tale temperatura.

Dato che solo l'elio permette di studiare le temperature prossime allo zero assoluto, esso ha acquistato grande importanza nella scienza sia pura sia applicata. L'atmosfera non ce ne può fornire grandi quantità: le fonti più importanti sono i pozzi di gas naturale in cui talora filtra dell'elio formatosi in seguito al decadimento dell'uranio e del torio nella crosta terrestre. Il gas prodotto dal pozzo più ricco finora noto, nel Nuovo Messico, contiene il 7,5 per cento di elio.

CRIOGENIA.

Stimolati dagli strani fenomeni scoperti in prossimità dello zero assoluto, naturalmente i fisici hanno fatto ogni sforzo per avvicinarsi il più possibile a tale limite, allargando le loro conoscenze di quella che oggi vien chiamata "criogenia".

L'evaporazione dell'elio liquido può, in particolari condizioni, produrre temperature che si spingono fino a 0,5 gradi K. (Detto per inciso, a tali livelli, per misurare le temperature si ricorre a metodi speciali, basati sull'elettricità - per esempio si misura la corrente generata in una termocoppia, o la resistenza di un filo fatto di un metallo non superconduttore, o i mutamenti delle proprietà magnetiche, o anche la velocità del suono nell'elio. Misurare le temperature estremamente basse è quasi altrettanto difficile che raggiungerle.) Si sono ottenute temperature significativamente inferiori a 0,5 gradi K mediante una tecnica proposta per la prima volta nel 1925 dal fisico olandese Peter Joseph Wilhelm Debye. Una "sostanza paramagnetica" (cioè una sostanza che concentra le linee di forza magnetiche) vien posta quasi a contatto con l'elio liquido, da cui resta separato solo da elio gassoso, e si porta la temperatura di tutto il sistema all'incirca a 1 grado K. Poi si colloca il sistema all'interno di un campo magnetico. Le molecole della sostanza paramagnetica si dispongono parallelamente alle linee di forza del campo, cedendo nel contempo del calore, che viene disperso attraverso un'ulteriore leggera evaporazione dell'elio circostante. Ora si toglie il campo magnetico: le molecole paramagnetiche si orientano immediatamente in modo casuale; per passare da una disposizione ordinata a una casuale, le molecole devono assorbire calore, l'unica fonte del quale è l'elio liquido. Pertanto la temperatura di quest'ultimo scende ancora.

Questo processo può essere ripetuto più volte, e ogni volta la temperatura dell'elio liquido si abbassa ulteriormente. Questa tecnica è stata perfezionata dal chimico americano William Francis Giauque, che per tali studi ricevette il premio Nobel per la chimica nel 1949. Si riuscì in tal modo a raggiungere, nel 1957, una temperatura di 0,00002 gradi K.

Nel 1962, il fisico anglo-tedesco Heinz London e i suoi collaboratori proposero un nuovo espediente per ottenere temperature ancora inferiori. L'elio si presenta in due varietà, "elio 4" ed "elio 3", che solitamente si mescolano in modo perfetto; ma se la temperatura è inferiore a circa 0,8 gradi K, si separano: l'elio 3 forma uno strato al di sopra, ma una parte di esso resta al di sotto, insieme all'elio 4; è possibile fare in modo che questa porzione oscilli, attraversando in su e in giù il confine tra i due strati, e facendo abbassare ogni volta la temperatura, analogamente a quanto avviene con i passaggi da liquido a vapore di un refrigerante ordinario, come il freon.

Apparecchi di raffreddamento basati su questo principio sono stati costruiti per la prima volta in Unione Sovietica nel 1965. Nel 1950, il fisico russo Isaak Yakovievic' Pomerancuk aveva messo a punto un metodo per raggiungere temperature bassissime, facendo ricorso ad altre proprietà dell'elio 3; e già nel 1934 il fisico angloungherese Nicholas Kurti aveva suggerito l'uso di proprietà magnetiche analoghe a quelle utilizzate da Giauque, ma relative al nucleo dell'atomo (cioè alla sua struttura più interna), e non agli atomi o alle molecole intesi globalmente.

Con queste nuove tecniche sono state raggiunte temperature fino a 0,000001 gradi K. Ora che i fisici si trovano a una distanza di un milionesimo di grado dallo zero assoluto, non potrebbero liberarsi di quel minimo di entropia residua, raggiungendo alfine l'obiettivo?

La risposta è: no! Lo zero assoluto non è raggiungibile - come dimostrò Nernst in uno studio sull'argomento che gli fruttò il premio Nobel, e nel quale stabilì l'annullarsi dell'entropia di un sistema allo zero assoluto ("terzo principio della termodinamica"). In qualsiasi processo di abbassamento della temperatura si può rimuovere solo parte dell'entropia; in generale, sottrarre metà dell'entropia a un sistema risulta ugualmente difficile, a prescindere da quale sia l'entropia totale. Così, è altrettanto difficile passare da 300 gradi K (circa la temperatura ambiente) a 150 gradi K (più freddo di qualunque temperatura registrata nell'Antartide), che passare da 20 gradi K a 10 gradi K. Proseguendo, è altrettanto difficile passare da 10 gradi K a 5 gradi K che da 5 gradi K a 2,5 gradi K, e così via. Una volta arrivati a un milionesimo di grado dallo zero assoluto, l'impresa di passare a mezzo milionesimo presenta le stesse difficoltà del passaggio da 300 gradi K a 150 gradi K, e, se ci si riuscisse, lo stesso varrebbe per scendere a un quarto di milionesimo, e così via.

Lo zero assoluto resta a distanza infinita, per quanto possa sembrare di esserglisi avvicinati.

Gli stadi finali della caccia allo zero assoluto hanno comunque portato a uno studio più approfondito dell'elio 3, una sostanza estremamente rara. L'elio di per sé non è affatto comune sulla terra; e, quando viene isolato, solo 13 atomi ogni dieci milioni sono di elio 3, mentre i restanti sono di elio 4.

L'atomo dell'elio 3 è un po' più semplice di quello dell'elio 4; la sua massa è solo tre quarti di quella della varietà più comune. Il punto di liquefazione dell'elio 3 è a 3,2 gradi K, ben un grado sotto quello dell'elio 4. Ma c'è di più: in un primo tempo si credeva che, mentre l'elio 4 diventa superfluido a temperature inferiori a 2,2 gradi K, l'elio 3 (che ha una molecola meno simmetrica, anche se più semplice) non mostrasse alcun segno di superfluidità. Ma non c'era che da insistere nei tentativi. Nel 1972, si scoprì che l'elio 3 si trasforma in elio secondo superfluido a temperature inferiori a 0,0025 gradi K.

ALTE PRESSIONI.

Uno dei nuovi orizzonti scientifici aperti dalle ricerche sulla liquefazione dei gas era quello della produzione di alte pressioni.

Sembrava che, sottoponendo a elevate pressioni varie forme di materia (non soltanto i gas), si sarebbero potute ottenere informazioni fondamentali sulla natura della materia, nonché sull'interno della terra. A una profondità di 11 chilometri, per esempio, la pressione è di 1000 atmosfere; a 650 chilometri è di 200 mila atmosfere; a 3200 chilometri è di 1,4 milioni di atmosfere; e al centro della terra, alla profondità di quasi 6400 chilometri, essa raggiunge 3,5 milioni di atmosfere. (Naturalmente, la terra è un pianeta piuttosto piccolo: le pressioni al centro di Saturno superano, si pensa, i 50 milioni di atmosfere, e quelle all'interno di Giove, ancora più grande, i 100 milioni.)

Il massimo ottenibile in laboratorio nel diciannovesimo secolo si aggirava sulle 3000 atmosfere, raggiunte da Emile Hilaire Amagat negli anni ottanta. Ma nel 1905 il fisico americano Percy Williams Bridgman cominciò a studiare nuovi metodi, che ben presto permisero di raggiungere pressioni di 20 mila atmosfere, facendo però scoppiare i piccolissimi recipienti metallici usati nei suoi esperimenti. Passato a materiali più resistenti, egli riuscì a produrre pressioni di mezzo milione di atmosfere. Per il suo lavoro sulle alte pressioni ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1946.

Bridgman riuscì a far sì che, sotto tali straordinarie pressioni, atomi e molecole assumessero configurazioni di maggior compattezza, che talora venivano mantenute anche quando si toglieva la pressione.

Per esempio, egli riuscì a convertire l'ordinario fosforo giallo, che non conduce l'elettricità, in una forma di fosforo nero che la conduce. Anche nell'acqua riuscì a produrre alterazioni sorprendenti.

Mentre il ghiaccio ordinario ha densità inferiore all'acqua, usando pressioni elevate Bridgman riuscì a produrre una serie di ghiacci ("ghiaccio secondo", "ghiaccio terzo" e così via) che non solo avevano densità maggiore dell'acqua liquida, ma restavano ghiaccio a temperature molto al di sopra del normale punto di congelamento. Il ghiaccio settimo è solido a temperature superiori al punto di ebollizione dell'acqua.

Il termine "diamante" richiama alla mente l'impresa più suggestiva nel campo delle alte pressioni. Il diamante, come è noto, è carbonio cristallizzato, come lo è la grafite. Se un elemento esiste in due forme diverse, tali forme vengono chiamate "allotrope": un esempio eclatante è appunto costituito da diamante e grafite; un altro esempio importante è quello dell'ozono e dell'ossigeno ordinario. Un altro esempio ancora sono i già citati fosforo giallo e fosforo nero (esiste anche il fosforo rosso).

L'aspetto e le proprietà degli allotropi possono differire molto, ed è in questo che la grafite e il diamante costituiscono l'esempio più stupefacente di allotropi - salvo, forse, quello del carbone e del diamante. (Dal punto di vista chimico, l'antracite non è che una versione difettosa della grafite.)

Che il diamante non sia altro che grafite (o carbone) con una differente organizzazione degli atomi appare, a prima vista, del tutto incredibile; ma la natura chimica del diamante era già stata dimostrata nel 1772 da Lavoisier e da alcuni altri chimici francesi: tutti insieme essi avevano acquistato un diamante, che poi avevano riscaldato fino a una temperatura sufficiente a farlo bruciare, verificando che il gas prodotto era anidride carbonica. In seguito il chimico inglese Smithson Tennant mostrò che la quantità di anidride carbonica rilevata poteva essere prodotta soltanto se il diamante era carbonio puro, come la grafite; e nel 1799 il chimico francese Guyton de Morveau tagliò la testa al toro convertendo un diamante in un pezzo di grafite.

Si trattava certamente di un'operazione in perdita; ma perché non pensare che la si potesse compiere in direzione opposta? Il diamante ha una densità del 55 per cento superiore a quella della grafite.

Perché non mettere sotto pressione la grafite, costringendo i suoi atomi ad assumere la configurazione più compatta che caratterizza il diamante?

Si fecero molti tentativi; e diversi sperimentatori, come gli alchimisti, riferirono di avere avuto successo. L'episodio più famoso è quello di cui fu protagonista il chimico francese Ferdinand Frédéric Henri Moissan, che nel 1893 sciolse della grafite nella ghisa fusa e sostenne di aver trovato nella massa dei piccoli diamanti, dopo il raffreddamento; si trattava in prevalenza di piccoli oggetti neri, impuri: uno, però, era lungo quasi un millimetro e non era colorato. I risultati raggiunti da Moissan furono perlopiù accettati come validi, e si ritenne a lungo che egli avesse fabbricato dei diamanti sintetici; nessuno, però, riuscì mai a ripetere con successo il suo esperimento.

La caccia al diamante sintetico ebbe anche dei risultati utili collaterali: nel 1891 l'inventore americano Edward Goodrich Acheson, riscaldando della grafite in condizioni che riteneva adatte per il formarsi di diamanti, si imbatté casualmente nel carburo di silicio, a cui diede il nome commerciale di carborundum. Esso si dimostrò la sostanza più dura fra tutte quelle note, salvo il diamante, e fin da allora è stato largamente usato come abrasivo - cioè, per molare e levigare.

L'efficienza di un abrasivo dipende dalla sua durezza. Un abrasivo può levigare o molare sostanze aventi una durezza inferiore alla propria; sotto questo aspetto, il diamante è la sostanza più adatta, essendo quella di durezza massima. Generalmente la durezza viene misurata in riferimento alla "scala di Mohs", introdotta dal mineralogista tedesco Friedrich Mohs nel 1818; tale scala va da 1 a 10, e assegna il numero 1 al talco e il 10 al diamante. Un minerale con una durezza definita da un dato numero della scala può scalfire tutti i minerali contrassegnati nella medesima scala da un numero inferiore. Il carborundum ha durezza 9. Le suddivisioni della scala di Mohs non sono, però,

equivalenti: su una scala lineare la differenza di durezza tra 10 (diamante) e 9 (carborundum) è quadrupla della differenza tra 9 (carborundum) e 1 (talco).

Non è difficile capire il perché delle differenti durezze. Nella grafite, gli atomi di carbonio sono disposti in strati, in ciascuno dei quali essi sono ordinati in esagoni a mosaico, come le piastrelle del pavimento di una stanza da bagno. Ogni atomo di carbonio è legato ad altri tre in ugual modo; e, poiché l'atomo del carbonio è piccolo, gli atomi contigui si trovano vicini tra loro e strettamente legati.

È difficile strappar via una di queste tessere esagonali, ma è abbastanza facile spezzare il mosaico, data la sua sottigliezza. Gli strati di questo mosaico sono piuttosto distanziati in senso verticale; vi è così un debole legame tra uno strato e quello sovrastante o sottostante: è dunque facile far scorrere uno strato sull'altro. Per tale ragione, la grafite non soltanto non è particolarmente dura, ma anzi può essere usata come lubrificante.

Invece, in un diamante gli atomi di carbonio sono disposti con una simmetria tridimensionale assoluta. Ogni atomo di carbonio è legato a quattro altri atomi a distanze uguali; ciascuno dei quattro si trova infatti a un vertice di un tetraedro, al cui centro si trova l'atomo di carbonio considerato. È una disposizione molto compatta, ed è per questo che il diamante è considerevolmente più denso della grafite; non è possibile spezzarlo in alcuna direzione, a meno di usare forze eccezionali. Esistono altri atomi capaci di assumere la "configurazione del diamante"; ma l'atomo del carbonio è il più piccolo di tutti, ed è quello che forma i legami più resistenti.

Pertanto il diamante è più duro di qualsiasi altra sostanza nelle condizioni esistenti alla superficie della terra.

Nel carburo di silicio, metà degli atomi di carbonio sono sostituiti da atomi di silicio, ed essendo questi molto più grandi di quelli di carbonio, non stanno così vicini a quelli contigui e hanno legami più deboli. È per questo che il carburo di silicio non ha la durezza del diamante (pur essendo abbastanza duro per essere utile in molte applicazioni).

Nelle condizioni che prevalgono alla superficie della terra, la disposizione degli atomi di carbonio nella grafite è più stabile di quella esistente nel diamante, così che quest'ultimo ha una certa tendenza a trasformarsi spontaneamente in grafite. Non c'è comunque pericolo di svegliarsi una mattina e scoprire che il proprio magnifico anello con diamante ha perso il suo valore durante la notte: gli atomi di carbonio, anche nella loro disposizione instabile, sono così strettamente legati che ci vorrebbero molti milioni di anni perché questo potesse avvenire.

Tale differenza di stabilità rende ancora più difficile trasformare la grafite in diamante. Fu soltanto negli anni trenta che i chimici riuscirono finalmente a calcolare le pressioni necessarie per convertire la grafite in diamante. Si scoprì che la conversione richiedeva una pressione di almeno 10 mila atmosfere, e anche così sarebbe stata incredibilmente lenta. Elevando la temperatura si sarebbe accelerata la conversione, ma allora si sarebbero dovute aumentare anche le pressioni esercitate. A 1500 gradi C, sarebbe stata necessaria una pressione di almeno 30 mila atmosfere. Tutto ciò dimostrava che Moissan e i suoi contemporanei, nelle condizioni in cui avevano operato, non potevano aver prodotto dei diamanti più di quanto gli alchimisti avessero potuto produrre dell'oro. (C'è ragione di pensare che Moissan sia stato in realtà vittima di un suo assistente, il quale, stufo dei tediosi esperimenti, avrebbe deciso di porvi fine introducendo un diamante vero nella miscela di ghisa e grafite.)

Avvalendosi del lavoro pionieristico di Bridgman nel campo delle alte temperature e pressioni, alcuni scienziati della General Electric Company riuscirono infine a compiere l'impresa nel 1955, producendo pressioni di 100 mila atmosfere e più insieme a temperature che raggiungevano i 2500 gradi C. Inoltre essi usarono una piccola quantità di un metallo come il cromo per formare una pellicola liquida che attraversava la grafite: fu proprio su tale pellicola che avvenne la conversione della grafite in diamante. Nel 1962 si poterono raggiungere una pressione di 200 mila atmosfere e una temperatura di 5000 gradi C: in tali condizioni la grafite venne direttamente convertita in diamante, senza il ricorso a un catalizzatore.

I diamanti sintetici sono troppo piccoli e pieni di impurità per essere usati come gemme, ma oggi vengono prodotti su scala industriale come abrasivi e per arnesi da taglio; anzi, sono il materiale più usato a tale scopo. Qualche anno fa si riuscì a produrre occasionalmente un piccolo diamante avente la qualità di una gemma.

Un prodotto più recente ottenuto con un trattamento dello stesso tipo può integrare l'uso del diamante: un composto di boro e azoto ("nitruro di boro") ha proprietà molto simili a quelle della grafite (con la differenza che è bianco, mentre la grafite è nera). Sottoposto alle stesse condizioni di pressione e temperatura che convertono la grafite in diamante, anche il nitruro di boro subisce un'analoga conversione: i suoi atomi, che prima avevano la disposizione tipica dei cristalli della grafite, assumono ora una disposizione simile a quella del diamante; esso viene chiamato, in questa nuova forma, "borazone". Tale sostanza ha durezza quadrupla di quella del carborundum, e inoltre offre il grande vantaggio di essere più resistente al calore. A una temperatura di 900 gradi C, il diamante brucia, mentre il borazone resta immutato.

Il boro ha un elettrone in meno del carbonio: l'azoto, un elettrone in più. I due, combinati alternativamente, producono una situazione molto simile alla disposizione carbonio-carbonio, ma con qualche leggero scarto rispetto alla simmetria perfetta riscontrata nel diamante.

Pertanto il nitruro di boro non ha la stessa durezza del diamante.

Il lavoro di Bridgman sulle alte pressioni non costituisce l'ultima parola in materia, naturalmente. All'inizio degli anni ottanta, Peter M. Bell della Carnegie Institution fece uso di una macchina capace di comprimere dei materiali tra due diamanti, riuscendo a raggiungere pressioni di 1milione 500 mila atmosfere, più dei due quinti di quella esistente al centro della terra. Bell ritiene che sia possibile, con tale strumento, raggiungere i 17 milioni di atmosfere, prima che gli stessi diamanti cedano.

All'Istituto di Tecnologia della California (CalTech) sono state usate onde d'urto per produrre pressioni istantanee ancora superiori - forse fino a 75 milioni di atmosfere.

I METALLI.

La maggior parte degli elementi della tavola periodica sono metalli.

In realtà solo una ventina degli oltre 100 elementi della tavola possono essere considerati decisamente non metallici. Eppure l'uso dei metalli è iniziato relativamente tardi nella storia della specie umana; una delle ragioni è che gli elementi metallici, salvo rare eccezioni, in natura si trovano combinati con altri elementi, e non è facile riconoscerli ed estrarli. I popoli primitivi facevano uso, ai primordi, solo di materiali che potessero essere trattati con tecniche semplici, cioè che potessero essere incisi, scheggiati, tagliati e levigati; i materiali usati si limitavano quindi alle ossa, alle pietre e al legno.

Forse i popoli primitivi hanno fatto la conoscenza dei metalli attraverso la scoperta di meteoriti, o di piccole pepite d'oro, o di rame metallico rinvenuto nelle ceneri di fuochi accesi sopra pietre che contenevano dei minerali di rame. Comunque siano andate le cose, quei primitivi che furono abbastanza curiosi (e abbastanza fortunati) da trovare queste strane nuove sostanze e da andare alla ricerca di modi per trattarle, se ne trovarono molto avvantaggiati. Una delle differenze tra i metalli e le pietre è il fatto che i primi, strofinati, acquistano un luccichio gradevole; inoltre i metalli possono essere ridotti in lamine o tirati in fili. Possono essere fusi e versati in uno stampo dove solidificano. I metalli sono molto più belli e molto più versatili delle pietre, e come ornamenti sono l'ideale. Probabilmente l'utilizzazione dei metalli negli ornamenti ha preceduto di molto qualsiasi altro uso.

In virtù della loro rarità, del loro aspetto attraente e del fatto che non si alterano con il tempo, questi metalli furono apprezzati e barattati, finché divennero un vero e proprio mezzo di scambio.

Originariamente i pezzi di metallo (oro, argento o rame) dovevano essere pesati a ogni transazione commerciale, ma verso il 700 avanti Cristo, nel regno di Lidia, in Asia Minore, e nell'isola di Egina, nel mar Egeo, vennero messi in circolazione dei pesi metallici standardizzati recanti un contrassegno del governo ufficiale. E le monete non ci hanno più abbandonato fino ai nostri giorni.

Il fatto che più di tutto il resto diede valore ai metalli fu la scoperta che con alcuni di essi si potevano ottenere lame più taglienti di quelle ottenute lavorando la pietra, e che tali lame si mantenevano affilate anche in condizioni in cui un'ascia di pietra si sarebbe rovinata. Inoltre il metallo era resistente: un colpo che avrebbe mandato in pezzi un bastone di legno o frantumato un'ascia di pietra si limitava a deformare leggermente un oggetto metallico di forma simile. Questi vantaggi compensavano abbondantemente il fatto che il metallo è più pesante della pietra e meno facile da trovare e da trattare.

Il primo metallo ottenuto in quantità significative fu il rame, che era di uso comune già attorno al 4000 avanti Cristo. Da solo il rame è troppo poco resistente per poterne fabbricare armi o corazze soddisfacenti (benché se ne possano ricavare graziosi ornamenti), ma esso si trovava spesso in lega con un poco di arsenico o di antimonio, il che dava come risultato una sostanza più dura del metallo puro. Più tardi furono probabilmente trovati minerali di rame che contenevano dello stagno: la lega rame-stagno, cioè il bronzo, era sufficientemente dura per consentirne l'uso nella fabbricazione di armi. Gli uomini impararono ben presto ad aggiungere di proposito lo stagno al rame: l'Età del bronzo sostituì l'Età del rame in Egitto e nell'Asia occidentale verso il 3000 avanti Cristo, e nell'Europa sudorientale verso il 2000 avanti Cristo. L'"Iliade" e l'"Odissea" di Omero hanno immortalato quella fase dell'evoluzione della civiltà. Il ferro era noto fin da quando era noto il bronzo, ma i meteoriti ne furono a lungo l'unica fonte. Esso rimase soltanto un metallo prezioso, limitato a qualche uso sporadico, fino a quando si scoprirono delle tecniche per estrarne quantità illimitate fondendo i minerali ferrosi. La difficoltà stava nel lavorare con fuochi a temperature molto elevate e nel trovare il modo di aggiungere carbonio al ferro per indurirlo fino a ottenere quello che noi oggi chiamiamo "acciaio". La fusione del ferro ebbe inizio in qualche punto dell'Asia Minore verso il 1400 avanti Cristo e si sviluppò e diffuse lentamente.

Un esercito munito di armi di ferro era in grado di sbaragliare un esercito con armi di bronzo, perché le spade di ferro riuscivano a forare gli scudi e le armature di bronzo. Gli ittiti, in Asia Minore, furono i primi a usare comunemente armi di ferro, e infatti godettero di un periodo di egemonia nell'Asia occidentale. In seguito gli assiri succedettero agli ittiti. Nell'800 avanti Cristo essi avevano un esercito completamente attrezzato con armi di ferro, destinato a dominare sull'Asia occidentale e sull'Egitto per due secoli e mezzo.

All'incirca in quella stessa epoca i dori portarono in Europa l'Età del ferro, invadendo la Grecia e sconfiggendo gli achei, che avevano commesso l'errore di arrestarsi all'Età del bronzo.

FERRO E ACCIAIO.

Il ferro si ottiene essenzialmente riscaldando minerale di ferro (solitamente un ossido ferrico) con carbonio. Gli atomi di carbonio sottraggono l'ossigeno all'ossido ferrico, lasciando come residuo ferro puro. Nell'antichità venivano usate temperature che non arrivavano a fondere il ferro, e il prodotto ottenuto era un metallo resistente che poteva essere lavorato per dargli la forma voluta con il martello - ottenendo cioè quello che viene chiamato "ferro battuto". La metallurgia del ferro su scala più vasta ebbe inizio solo nel Medioevo, allorché si fabbricarono fornaci speciali, dove si ottenevano temperature abbastanza alte da fondere il ferro. Allora divenne possibile anche versare in stampi il ferro fuso, che prese il nome di "ghisa". Quest'ultima era assai meno costosa del ferro battuto ed era anche molto più dura, ma era fragile e non poteva essere lavorata col martello. L'aumento della domanda di ferro nelle due forme contribuì, tra l'altro, al diboscamento dell'Inghilterra, le cui foreste venivano consumate per rifornire di legna le fornaci per la fusione del

ferro. In seguito, nel 1780, l'inglese Abraham Darby mostrò che il "coke" andava altrettanto bene, se non meglio, del "carbone di legna", e lo sfruttamento delle foreste a questo scopo cessò: cominciò allora il predominio del carbone come fonte di energia, durato poi per più di un secolo.

Si dovette arrivare alla fine del diciottesimo secolo perché i chimici, grazie al fisico francese René Antoine Ferchault de Réaumur, comprendessero finalmente che era il contenuto di carbonio a determinare la tenacità e la durezza del ferro. Per elevare al massimo queste proprietà, il contenuto di carbonio deve essere compreso tra lo 0,2 e 1'1,5 per cento; si ottiene allora un acciaio più duro e più tenace, e in generale più resistente, sia della ghisa che del ferro battuto. Fino alla metà del diciannovesimo secolo, però, per ottenere acciaio di alta qualità si doveva ricorrere al complesso procedimento consistente nell'aggiungere l'esatta quantità di carbonio al ferro battuto (già di per sé stesso piuttosto costoso). L'acciaio restava così un materiale di lusso, usato solo quando non lo si poteva sostituire con altro materiale - come nel caso delle spade e delle molle.

L'Età dell'acciaio venne inaugurata da un ingegnere inglese, Henry Bessemer. Egli si interessava originariamente di cannoni e proiettili e aveva inventato un sistema di rigatura della canna che doveva consentire al cannone di sparare con maggior precisione e a maggiore distanza. Napoleone Terzo di Francia si interessò alla cosa e offrì un finanziamento per portare avanti gli esperimenti; ma un esperto di balistica francese troncò l'iniziativa facendo osservare che l'esplosione propulsiva a cui pensava Bessemer avrebbe mandato in pezzi i cannoni, che a quei tempi erano fatti di ghisa. Bessemer, assai contrariato, decise di dedicarsi al problema di ottenere del ferro più resistente. Non sapendo nulla di metallurgia, egli era in grado di affrontare la questione con la mente libera da idee precostituite. La ghisa era fragile a causa del suo contenuto di carbonio; il problema era dunque di ridurre la percentuale di carbonio.

Perché, allora, non insufflare un getto d'aria nel ferro durante la fusione, in modo da bruciare tutto il carbonio? Sulle prime sembrava un'idea assurda. Si poteva pensare che l'aria avrebbe raffreddato il metallo fuso facendolo solidificare. Bessemer ad ogni modo fece la prova e scoprì che era vero proprio il contrario: l'aria, bruciando il carbonio, forniva calore, e la temperatura del ferro, anziché scendere, aumentava. Il carbonio bruciava regolarmente. In condizioni adeguatamente controllate, si poteva produrre acciaio in gran quantità, a un costo relativamente basso.

Nel 1856 Bessemer presentò il suo "altoforno". I produttori di ferro adottarono questo metodo con entusiasmo, ma lo abbandonarono subito, quando scoprirono con disappunto che l'acciaio così ottenuto era di qualità inferiore. Bessemer, accortosi che il minerale di ferro usato dall'industria conteneva fosforo (che invece non c'era nei suoi campioni), tentò di far capire agli industriali che era stato il fosforo a tradirli, ma essi non vollero correre il rischio di un secondo insuccesso. Bessemer fu costretto a indebitarsi per mettere in piedi un proprio impianto siderurgico a Sheffield. Importando dalla Svezia minerale di ferro privo di fosforo, riuscì in poco tempo a produrre acciaio a un prezzo assai inferiore a quello della concorrenza.

Nel 1875, il metallurgista britannico Sidney Gilchrist Thomas scoprì che, rivestendo l'interno del forno di calce e magnesia, si poteva facilmente eliminare il fosforo dal ferro fuso. Dopo questa scoperta, fu possibile usare pressoché qualsiasi minerale di ferro per la produzione dell'acciaio. Nel frattempo, nel 1868, l'inventore anglo-tedesco Karl Wilhelm Siemens elaborò un metodo, oggi chiamato processo Martin-Siemens, in cui viene riscaldata ghisa grezza insieme a minerali di ferro, riuscendo anche in tal modo a tener sotto controllo il contenuto di fosforo.

A questo punto l'Età dell'acciaio poté davvero iniziare. Non si tratta di un semplice modo di dire: senza l'acciaio, i grattacieli, i ponti sospesi, le grandi navi, le ferrovie e tante altre realizzazioni moderne sarebbero stati quasi inconcepibili; anche oggi, nonostante che molti altri metalli siano entrati nell'uso, l'acciaio resta il metallo preferito per una grandissima quantità di applicazioni quotidiane, dalle carrozzerie delle automobili ai coltelli.

(Naturalmente è sbagliato pensare che un qualsiasi progresso sia in grado di modificare in maniera radicale il modo di vivere dell'umanità. Mutamenti di questo genere sono sempre il risultato di un complesso di progressi dalle molteplici interrelazioni. Per esempio, tutto l'acciaio del

mondo non avrebbe reso possibili i grattacieli senza un'altra invenzione troppo spesso data per scontata, quella dell'ascensore. Nel 1861 l'inventore americano Elisha Graves Otis brevettò un ascensore idraulico; e nel 1889 la società da lui fondata installò i primi ascensori elettrici in un edificio commerciale di New York.)

Quando l'acciaio, non più tanto costoso, si fu ampiamente diffuso, si poté sperimentare l'aggiunta di altri metalli ("acciaio legato"), per migliorarlo ulteriormente. Il metallurgista inglese Robert Abbott Hadfield fu un pioniere in questo senso. Nel 1882, egli scoprì che, aggiungendo manganese all'acciaio nella misura del 13 per cento, si otteneva una lega più dura, che poteva essere usata per fabbricare il macchinario destinato a compiti particolarmente violenti, come quello di frantumare la roccia. Nel 1900, si scoprì che una lega di acciaio contenente tungsteno e cromo conservava la sua durezza alle alte temperature, anche quando si arroventava; questa lega si dimostrò molto utile per gli utensili destinati a lavorare a grande velocità.

Oggi esistono innumerevoli altre leghe di acciaio destinate a usi speciali, che contengono metalli come il molibdeno, il nichel, il cobalto e il vanadio.

Il problema più serio è la facilità con cui l'acciaio subisce l'ossidazione - un processo che riporta il ferro allo stato grezzo che aveva nel minerale da cui è stato estratto. Un modo per combattere questo inconveniente consiste nel proteggere l'acciaio verniciandolo o rivestendolo con un metallo meno esposto alla corrosione - come il nichel, il cromo, il cadmio o lo stagno. Un metodo più efficace consiste nel formare una lega che non si ossidi. Nel 1913, il metallurgista inglese Harry Brearley scoprì casualmente una lega del genere, mentre stava cercando di realizzare leghe d'acciaio particolarmente adatte per le canne delle armi da fuoco. Tra i campioni che scartò come inadatti vi era una lega di nichel-cromo; alcuni mesi dopo, gli capitò di osservare che, nel mucchio degli scarti, i rottami di questa lega erano ancora lucenti, mentre gli altri erano arrugginiti. Era la nascita dell'"acciaio inossidabile", che, pur essendo troppo poco duro e troppo costoso per venir usato nelle costruzioni su larga scala, serve mirabilmente nella coltelleria e in piccoli apparecchi in cui il fatto di non arrugginire è più importante della durezza.

Dato che nel mondo si spende, con scarso successo, qualcosa come un miliardo di dollari all'anno per cercare di evitare la corrosione dell'acciaio e del ferro, la ricerca di un prodotto antiruggine universale procede senza sosta; una scoperta recente piuttosto interessante è quella che i "pertecnetati" (composti del tecnezio) proteggono il ferro dalla ruggine. Naturalmente questo elemento raro, prodotto in laboratorio, non potrà forse mai essere utilizzato su vasta scala; tuttavia esso costituisce un prezioso strumento di ricerca. La sua radioattività consente ai chimici di seguirne le sorti, osservando cosa gli accade sulla superficie del ferro.

Una delle proprietà più utili del ferro è il suo forte ferromagnetismo; lo stesso ferro è un esempio di "magnete dolce": esso si magnetizza facilmente sotto l'azione di un campo elettrico o magnetico - cioè i suoi domini magnetici (vedi capitolo quinto) si allineano facilmente. Inoltre si smagnetizza facilmente quando il campo si annulla: i suoi domini riprendono allora l'orientamento casuale. Questa rapida perdita del magnetismo può essere utile, per esempio nelle elettrocalamite, in cui il nucleo di ferro viene magnetizzato facilmente quando si fa passare la corrente, mentre la possibilità di smagnetizzarlo con altrettanta facilità togliendo la corrente è più problematica.

Dopo la seconda guerra mondiale è stata sviluppata una seconda classe di magneti dolci, le "ferriti", di cui sono esempi la ferrite di nichel ($NiFe_2O_4$) e la ferrite di manganese ($MnFe_2O_4$), usate nei computer come elementi che devono acquistare o perdere il magnetismo con la massima facilità e rapidità.

I "magneti duri", invece, i cui domini sono difficili da orientare oppure da disordinare una volta orientati, conservano la magnetizzazione a lungo dopo averla acquisita. Fra gli esempi più comuni vi sono varie leghe di acciaio; sono però risultate dotate di questa proprietà alcune leghe che non contengono ferro o ne contengono assai poco. L'esempio più noto è l'"alnico", scoperto nel 1931, una varietà del quale è fatta di alluminio, nichel e cobalto (dalle cui sillabe iniziali deriva il nome della lega), più una piccola quantità di rame.

Negli anni cinquanta sono state sviluppate tecniche basate sull'uso di ferro polverizzato, le cui particelle sono così piccole da ridursi a singoli domini. Tali domini possono essere orientati in una sostanza plastica fusa, che poi viene solidificata, in modo da mantenere il loro orientamento. Questi "magneti plastici" sono molto facili da sagomare e da stampare, ma possono anche essere resi adeguatamente resistenti.

I NUOVI METALLI.

Negli ultimi decenni abbiamo visto venire alla ribalta nuovi metalli estremamente utili - alcuni dei quali erano inutilizzati o addirittura sconosciuti fino a un secolo fa, e in certi casi fino alla nostra generazione. L'esempio più impressionante è quello dell'alluminio.

L'alluminio è il più comune tra i metalli - del 60 per cento più abbondante del ferro ma è anche estremamente difficile da estrarre dai minerali che lo contengono. Nel 1825 Hans Christian Oersted (che aveva scoperto il legame tra elettricità e magnetismo) separò una piccola quantità di alluminio impuro. In seguito molti chimici cercarono inutilmente di purificare il metallo, finché nel 1854 il chimico francese Henri Etienne Sainte-Claire Deville ideò finalmente un metodo per ottenere alluminio puro in quantità significative. L'alluminio è chimicamente tanto attivo che egli dovette usare sodio metallico (ancora più attivo) per spezzare il legame tra l'alluminio e gli atomi vicini. Per un certo periodo l'alluminio fu venduto a circa duecento dollari al chilo, il che ne faceva praticamente un metallo prezioso. Napoleone Terzo era appassionato di posaterie di alluminio e fece fabbricare un sonaglio dello stesso metallo per il figlioletto; e negli Stati Uniti, come segno della grandissima stima della nazione per George Washington, il monumento in suo onore venne rivestito di uno spesso strato di alluminio nel 1885.

Nel 1886, Charles Martin Hall, un giovane studente di chimica dell'Oberlin College, rimase talmente impressionato dall'asserzione del suo professore - chi avesse scoperto un metodo poco costoso di produzione dell'alluminio avrebbe fatto una fortuna - che decise di cimentarsi in tale impresa. In un laboratorio casalingo realizzato nella legnaia, Hall si accinse a mettere in pratica la ben nota scoperta di Humphry Davy che una corrente elettrica, attraversando un metallo fuso, ne separa degli ioni che si depositano sul catodo. Nella sua ricerca di un materiale capace di sciogliere l'alluminio, Hall si imbatté nella "criolite", un minerale che si trova in quantità notevoli solo in Groenlandia. (Oggi esiste la criolite sintetica.)

Hall disciolse l'ossido di alluminio nella criolite, fece fondere la miscela, e la fece attraversare da una corrente elettrica. Come previsto, sul catodo si raccolse dell'alluminio puro. Hall si precipitò dal suo professore con i primi lingotti del metallo. (Oggi essi sono conservati religiosamente presso la Aluminium Company of America.)

Come spesso accade, nello stesso anno un giovane chimico francese, Paul Louis Toussaint Héroult, che era esattamente coetaneo di Hall (aveva ventidue anni), scoprì lo stesso procedimento. (Per completare la coincidenza, entrambi morirono nel 1914.)

Anche se il "processo Hall-Héroult" aveva fatto dell'alluminio un metallo a basso costo, esso restava pur sempre più caro dell'acciaio, perché i minerali di alluminio utilizzabili sono meno comuni di quelli di ferro, e anche perché l'elettricità (indispensabile nel caso dell'alluminio) costa di più del carbone (indispensabile per l'acciaio). Tuttavia, l'alluminio presenta due grandi vantaggi rispetto all'acciaio: primo, è leggero (pesa solo un terzo dell'acciaio); secondo, nell'alluminio l'ossidazione provoca soltanto la formazione sulla superficie di una sottile pellicola trasparente, che difende gli strati più profondi dalla corrosione senza influire sull'aspetto del metallo.

L'alluminio puro è piuttosto molle, ma nelle leghe questa proprietà può essere modificata. Nel 1906, il metallurgista tedesco Alfred Wilm ottenne una lega molto tenace, aggiungendo all'alluminio una piccola quantità di rame e una ancor più piccola di magnesio. Egli vendette i diritti del suo brevetto alla società tedesca Durener Metallwerke, che diede a tale lega il nome di duralluminio.

Gli ingegneri si resero ben presto conto dell'enorme utilità in aeronautica di un metallo leggero ma resistente. Durante la prima guerra mondiale, i tedeschi impiegarono il duralluminio nei dirigibili zeppelin, e gli inglesi ne appresero la composizione analizzando la lega ricavata da uno zeppelin abbattuto: in seguito, l'uso della nuova lega si diffuse in tutto il mondo. Dato che il duralluminio non era altrettanto resistente dell'alluminio alla corrosione, gli esperti di metallurgia lo ricoprirono di sottili fogli di alluminio puro, formando il prodotto che venne chiamato alclad.

Oggi esistono leghe di alluminio che, a parità di peso, sono più robuste di taluni acciai. In genere si è cercato di sostituire l'alluminio all'acciaio ovunque la leggerezza e la resistenza alla corrosione siano più importanti della mera robustezza. L'alluminio è diventato, come tutti sanno, un metallo di uso pressoché universale, negli aerei, nei razzi, nei treni, nelle automobili, nelle porte, negli schermi, nei rivestimenti delle case, nelle vernici, negli utensili da cucina, nei fogli per avvolgere, e in mille altri usi.

E ora veniamo al "magnesio", un metallo ancora più leggero dell'alluminio. Esso è usato soprattutto in aeronautica, com'era facile da prevedersi - già nel 1910 la Germania usava in questo settore leghe di magnesio e zinco. Dopo la prima guerra mondiale, si diffuse sempre più l'uso di leghe magnesio-alluminio.

Circa quattro volte meno abbondante rispetto all'alluminio e più attivo chimicamente, il magnesio è più difficile da estrarre dai minerali. Fortunatamente, però, ve ne è una ricca riserva negli oceani. Il magnesio, a differenza dell'alluminio o del ferro, abbonda nell'acqua marina. L'oceano contiene sostanze in soluzione in una quantità che raggiunge il 3,5 per cento della sua massa; di questo materiale disciolto, il 3,7 per cento sono ioni di magnesio. Pertanto l'oceano nel suo insieme contiene circa 2 quadrilioni (2 000 000 000 000 000) di tonnellate di magnesio, cioè quanto basta per i nostri usi per un tempo illimitato.

Il problema era di estrarlo. Il metodo prescelto fu quello di pompare l'acqua marina in grandi cisterne e aggiungere ossido di calcio (ottenuto anch'esso dal mare, dai gusci delle ostriche). L'ossido di calcio reagisce con l'acqua e con gli ioni di magnesio, formando idrossido di magnesio, che, essendo insolubile, precipita. Trattando con acido cloridrico l'idrossido di magnesio, lo si converte in cloruro di magnesio; il magnesio metallico viene poi separato dal cloro per elettrolisi.

Nel gennaio 1941 la Dow Chemical Company produsse i primi lingotti di magnesio di origine marina, ponendo le premesse per un aumento di dieci volte della produzione di tale metallo durante gli anni di guerra.

In pratica, qualsiasi elemento che si possa convenientemente estrarre dall'acqua del mare può essere considerato come una riserva virtualmente illimitata, perché, una volta usato, esso fa ritorno nel mare. Si è stimato che, se si estraessero dall'acqua del mare cento milioni di tonnellate di magnesio ogni anno per un milione di anni, il contenuto di magnesio dell'oceano calerebbe dal suo valore attuale dello 0,13 per cento allo 0,12 per cento.

Se l'acciaio è stato il «metallo prodigio» del diciannovesimo secolo, l'alluminio quello degli inizi del ventesimo secolo e il magnesio quello degli anni cinquanta, quale sarà il prossimo metallo prodigio?

Le possibilità sono limitate: nella crosta terrestre i metalli veramente comuni sono soltanto sette. Oltre al ferro, all'alluminio e al magnesio, sono il sodio, il potassio, il calcio e il titanio. Il sodio, il calcio e il potassio sono di gran lunga troppo attivi chimicamente per poterli usare come materiali da costruzione. (Per esempio, reagiscono violentemente con l'acqua.) Resta il titanio, la cui abbondanza è circa un ottavo di quella del ferro.

Il titanio ha una combinazione straordinaria di buone qualità: la sua densità è poco più della metà di quella dell'acciaio; è più robusto, a parità di peso, dell'alluminio e dell'acciaio; è resistente alla corrosione e alle alte temperature. Per tutte queste ragioni, oggi si usa il titanio negli aerei, nelle navi e nei missili teleguidati, ogniqualvolta queste proprietà sono preziose.

Perché tutto ciò è stato scoperto così tardi? La ragione è un po' la stessa che nel caso dell'alluminio e del magnesio: il titanio ha una forte tendenza a reagire con le altre sostanze e nelle

sue forme impure - combinato con ossigeno o azoto - è un metallo fragile, apparentemente inutile e scarsamente interessante. La sua robustezza e tutte le altre sue qualità emergono solo quando viene isolato in forma realmente pura (nel vuoto, o in presenza di un gas inerte). Gli sforzi dei metallurgisti hanno avuto un tale successo che un chilo di titanio, che sarebbe costato 6000 dollari nel 1947, costava 4 dollari nel 1969.

Tuttavia, non si tratta tanto di ricercare nuovi metalli prodigiosi, quanto di rendere ancora più «prodigiosi» i metalli (e anche alcuni materiali non metallici) già noti.

Nella poesia di Oliver Wendell Holmes "The Deacon Masterpiece" si narra di un «piccolo calesse» che era stato fabbricato con cura, in modo tale da non avere punti deboli. Esso finì per cedere tutto in un colpo, andando in polvere: però, era durato un secolo.

La struttura atomica dei solidi cristallini, sia metallici che non metallici, ricorda molto questa situazione. I cristalli di un metallo sono crivellati da graffi e crepe submicroscopici; sotto pressione, una frattura può facilmente partire da uno di questi punti deboli e diffondersi subito nel cristallo. Se, come nel caso del calesse meraviglioso, si potesse fare in modo che non ci fossero punti deboli, il cristallo avrebbe una resistenza eccezionale.

Sulla superficie dei cristalli si formano effettivamente delle minuscole fibre cristalline prive di punti deboli, chiamate "whiskers" (baffi), la cui resistenza alla rottura è risultata pari a oltre 200 tonnellate per centimetro quadrato - cioè da 15 a 70 volte quella dell'acciaio. Se si riuscisse a fabbricare cristalli senza imperfezioni su larga scala, avremmo in mano un materiale di incredibile resistenza. Nel 1968, per esempio, gli scienziati sovietici produssero un piccolissimo cristallo di tungsteno privo di imperfezioni, capace di reggere un peso di circa 250 tonnellate per centimetro quadrato, in confronto alle 30 tonnellate per centimetro quadrato assicurate dal miglior acciaio esistente. E anche se non fosse possibile disporre di grandi quantità di queste sostanze senza imperfezioni, l'aggiunta di fibre prive di difetti ai metalli ordinari rinforzerebbe notevolmente questi ultimi.

Nel 1968, poi, è stato trovato un nuovo e interessante metodo per combinare i metalli. I due metodi tradizionali erano la "formazione di leghe", in cui vengono fusi insieme due o più metalli che formano una miscela più o meno omogenea, e la "placcatura", un processo in cui si riveste un materiale con una lamina di un altro materiale (solitamente si usa un sottile strato di un materiale costoso con cui si riveste la superficie di un metallo di minor prezzo: in tal modo si ha, per esempio, una superficie bella e resistente alla corrosione come quella dell'oro, mentre il costo dell'oggetto risulta poco superiore a quello del rame).

Il metallurgista americano Newell C. Cook e i suoi collaboratori stavano tentando di rivestire con uno strato di silicio una superficie di platino, e a questo scopo immergevano in un fluoruro alcalino fuso il platino; ma, invece del rivestimento che si aspettavano, ottennero tutt'altro: a quanto pare, il fluoruro fuso aveva rimosso la sottilissima pellicola di ossigeno legato solitamente presente anche sui metalli più resistenti, lasciando esposta la superficie «nuda» del platino agli atomi di silicio; invece di legarsi alla superficie sull'altro versante degli atomi di ossigeno, gli atomi di silicio erano penetrati "all'interno"; il risultato era stato che un sottile strato esterno del platino era diventato una lega.

Cook batté la nuova strada e trovò che questa tecnica era applicabile a parecchie sostanze: si trattava di «laminare» con una lega un metallo puro (o un'altra lega). Cook chiamò questo processo "metallidazione" e ben presto poté dimostrarne tutta l'utilità. Per esempio, aggiungendo dal 2 al 4 per cento di berillio al rame sotto forma di lega ordinaria si ottiene un materiale particolarmente resistente. Lo stesso risultato si può ottenere se si berillida il rame, con un consumo molto inferiore di berillio, elemento relativamente raro. Ancora, l'acciaio metallidato con il boro ("boridazione") diventa più duro. Anche l'aggiunta di silicio, cobalto e titanio produce proprietà utili.

In altre parole, i metalli prodigiosi non si trovano in natura, ma possono essere creati dall'ingegno umano.

Isaac Asimov.
IL LIBRO DELLA FISICA.
Arnoldo Mondadori Editore.
SECONDO VOLUME.

INDICE.

Capitolo 7. LE PARTICELLE:

L'atomo nucleare: Identificazione delle particelle - Il nucleo dell'atomo; Isotopi: Mattoni uniformi - Sulle tracce delle particelle - La trasmutazione degli elementi; Nuove particelle: Il neutrone - Il positrone - Elementi radioattivi - Acceleratori di particelle - Lo spin delle particelle - I raggi cosmici - La struttura del nucleo; I leptoni: Neutrini e antineutrini - La caccia al neutrino - L'interazione nucleare - Il muone - Il tauone - La massa del neutrino; Adroni e quark: Pioni e mesoni - Barioni - La teoria dei quark; I campi: L'interazione elettromagnetica - Le leggi di conservazione - Una teoria unitaria dei campi.

Capitolo 8. LE ONDE:

La luce: La natura della luce - La velocità della luce - Il radar - La propagazione delle onde luminose attraverso lo spazio - I monopoli magnetici - Moto assoluto; Relatività: Le equazioni di Lorentz- FitzGerald - La radiazione e la teoria dei quanti di Planck - Einstein e il dualismo onda-particella - La teoria della relatività - Lo spazio-tempo e il paradosso degli orologi - La gravità e la teoria della relatività generale di Einstein - Verifiche della teoria della relatività generale; II calore: Misurazione della temperatura - Due teorie del calore - Il calore come energia - Il calore e il moto molecolare; Massa ed energia; Onde e particelle: Microscopia elettronica - Gli elettroni come onde - Il principio di indeterminazione.

Capitolo 9. LA MACCHINA:

Fuoco e vapore: Tecnologia primitiva - La macchina a vapore; L'elettricità: Elettricità statica - Elettricità dinamica - Produzione dell'elettricità - Prime applicazioni tecnologiche dell'elettricità; Tecnologia elettrica: Il telefono - Registrazione del suono - La luce artificiale prima dell'elettricità - La luce elettrica - Fotografia; Motori a combustione interna: L'automobile - L'aeroplano; Elettronica: La radio - La televisione - Il transistor; Maser e laser: I maser - I laser.

Capitolo 10. IL REATTORE:

L'energia: Carbone e petrolio: combustibili fossili - Energia solare; Uso bellico del nucleo: La scoperta della fissione - La reazione a catena - La prima pila atomica - L'Era nucleare - La reazione termonucleare; Uso pacifico del nucleo: Navi a propulsione nucleare - Reattori nucleari per la produzione di elettricità - Reattori autofertilizzanti - I pericoli della radiazione - Utilizzo dei prodotti di fissione - Ricaduta radioattiva; Fusione nucleare controllata.

BIBLIOGRAFIA:

Capitolo 7.
LE PARTICELLE.

L'ATOMO NUCLEARE.

Come ho già detto nel capitolo precedente, attorno al 1900 si sapeva ormai che l'atomo non era una particella semplice e indivisibile, ma conteneva almeno una particella subatomica - l'elettrone, identificato da J. J. Thomson, il quale aveva suggerito l'idea che gli elettroni fossero immersi, come uvette in un dolce, nel corpo principale dell'atomo, dotato di carica positiva.

IDENTIFICAZIONE DELLE PARTICELLE.

Ben presto, però, si comprese che all'interno dell'atomo vi erano altre particelle. Becquerel, quando aveva scoperto la radioattività, si era reso conto che, mentre una parte della radiazione emessa dalle sostanze radioattive era costituita da elettroni, un'altra parte non lo era. I Curie in Francia ed Ernest Rutherford in Inghilterra avevano identificato una radiazione che era meno penetrante di un fascio di elettroni; Rutherford la denominò "raggi alfa", e chiamò "raggi beta" l'emissione formata da elettroni; pertanto gli elettroni, quando entrano a far parte di una radiazione, sono denominati "particelle beta". I raggi alfa risultarono anch'essi costituiti di particelle che furono chiamate "particelle alfa".

Nello stesso periodo il chimico francese Paul Ulrich Villard scoprì una terza forma di emissione radioattiva, cui fu dato il nome di "raggi gamma". (Alfa, beta e gamma sono le prime lettere dell'alfabeto greco.) Ben presto si comprese che i raggi gamma erano simili ai raggi X, ma avevano lunghezze d'onda inferiori.

Rutherford verificò sperimentalmente che un campo magnetico deviava le particelle alfa assai meno delle particelle beta, e in direzione opposta. Ne dedusse che la particella alfa aveva carica positiva, cioè opposta a quella dell'elettrone, dotato di carica negativa. Misurando la deflessione, si poté stabilire che le particelle alfa dovevano avere una massa almeno doppia di quella dello ione idrogeno, che possedeva la più piccola carica positiva nota. L'entità della deflessione dipende tanto dalla massa quanto dalla carica della particella. Se la carica positiva della particella alfa fosse stata uguale a quella dello ione idrogeno, la sua massa avrebbe dovuto essere doppia di quella dello ione idrogeno; se la sua carica fosse stata doppia, la sua massa avrebbe dovuto essere quadrupla, e così via.

Nel 1909, Rutherford chiarì la questione isolando le particelle alfa. Egli pose del materiale radioattivo in un tubo di vetro dalle pareti sottili, circondato da un tubo di vetro le cui pareti erano più spesse; tra i due tubi aveva fatto il vuoto. Le particelle alfa riuscivano ad attraversare la parete più sottile (quella interna), ma non quella più spessa (esterna), sulla quale rimbalzavano, perdendo energia, cosicché non erano più in grado di attraversare nemmeno la parete sottile, e restavano intrappolate nell'intercapedine. A quel punto Rutherford eccitò le particelle alfa con una scarica elettrica, facendo sì che emettessero luce, e constatò che emettevano le righe spettrali dell'elio. (È chiaro allora che le particelle alfa prodotte dalle sostanze radioattive del suolo sono la fonte dell'elio presente nei pozzi di gas naturale.) Se la particella alfa è un atomo di elio, deve avere massa quadrupla di quella dell'idrogeno. Pertanto, la sua carica positiva ammonta a due unità, ponendo pari a uno la carica dello ione idrogeno.

Rutherford in seguito identificò un'altra particella positiva nell'atomo, che in realtà era stata già osservata parecchi anni prima, senza però essere riconosciuta come tale. Nel 1886 il fisico tedesco Eugen Goldstein, usando un tubo a raggi catodici con un catodo perforato, aveva scoperto una nuova radiazione che passava attraverso i fori del catodo in direzione opposta ai raggi catodici,

e l'aveva chiamata "Kanalstrahlen" («raggi canale»). Fu proprio questa radiazione, nel 1902, a dare l'opportunità di osservare per la prima volta l'effetto Doppler-Fizeau (vedi capitolo secondo) in una sorgente luminosa terrestre. Il fisico tedesco Johannes Stark collocò uno spettroscopio in posizione tale che i raggi si dirigessero verso di esso, e rese così osservabile lo spostamento verso il violetto. Per questa ricerca gli fu assegnato il premio Nobel per la fisica nel 1919.

Dato che i raggi canale si muovono in direzione opposta a quella dei raggi catodici, che hanno carica negativa, Thomson propose di chiamarli "raggi positivi". Risultò che le particelle che costituivano i raggi positivi attraversavano facilmente la materia, e pertanto si suppose che il loro volume fosse molto inferiore a quello degli atomi o degli ioni ordinari. Misurando la deviazione subita da tali particelle in un campo magnetico, si giunse alla conclusione che la più piccola di esse aveva carica e massa uguali a quelle dello ione idrogeno, nell'ipotesi che quest'ultimo trasporti la più piccola quantità possibile di carica positiva; se ne dedusse che la particella che costituiva i raggi positivi fosse la particella positiva fondamentale - l'opposto dell'elettrone. Rutherford la denominò "protone" (dalla parola greca che significa «primo»).

Protone ed elettrone hanno effettivamente cariche elettriche uguali, benché di segno opposto, tuttavia la massa del protone è 1836 volte maggiore di quella dell'elettrone. A questo punto appariva verosimile che un atomo fosse composto di protoni ed elettroni, le cui cariche si controbilanciavano; sembrava anche probabile che i protoni stessero nell'interno dell'atomo, perché non possono essere facilmente staccati da quest'ultimo, com'è invece possibile per gli elettroni. Ora, però, l'interrogativo fondamentale riguardava la struttura formata da queste particelle costitutive dell'atomo.

IL NUCLEO DELL'ATOMO.

Fu lo stesso Rutherford a trovare il bandolo della matassa. Tra il 1906 e il 1908 egli seguitò a bombardare con le particelle alfa sottili lamine di metallo (d'oro o di platino, per esempio) per studiarne gli atomi: gran parte dei proiettili attraversavano la lamina senza essere deviati (così come delle pallottole possono passare tra le foglie di un albero indisturbate), ma non tutti. Rutherford aveva collocato dietro al metallo una lastra fotografica che fungeva da bersaglio, e trovò, intorno al suo centro, un'inaspettata rosa di colpi che si erano dispersi; alcune particelle, inoltre, erano rimbalzate all'indietro! Era come se alcune pallottole non fossero semplicemente passate tra le foglie, ma fossero rimbalzate su qualcosa di più solido.

Rutherford giunse alla conclusione che esse avevano colpito qualcosa di simile a un nucleo compatto, che occupava solo una parte molto piccola dell'atomo. A quanto sembrava, la maggior parte del volume dell'atomo doveva essere occupata dagli elettroni. Le particelle alfa «sparate» contro la lamina metallica incontravano perlopiù soltanto elettroni e attraversavano questo velo di particelle leggere senza venirne deviate; ogni tanto, però, poteva accadere che una particella alfa colpisse il nucleo più denso dell'atomo, e venisse deflessa. Il fatto che ciò accadesse molto raramente mostrava quanto dovessero essere minuscoli i nuclei atomici, visto che una particella che attraversa un foglio di metallo deve incontrare parecchie migliaia di atomi.

Era logico supporre che questo nucleo più compatto fosse fatto di protoni. Rutherford descrisse i protoni come una piccola folla addensata in un minuscolo "nucleo atomico" al centro dell'atomo. (In seguito è stato dimostrato che il diametro del nucleo è poco più di 1 su 100 mila di quello dell'atomo.)

Questo, dunque, è il modello fondamentale dell'atomo: un nucleo carico positivamente, che occupa uno spazio piccolissimo ma contiene quasi tutta la massa dell'atomo, circondato da una «schiuma» di elettroni che occupa quasi tutto il volume dell'atomo, ma praticamente non contribuisce alla sua massa. Per questa ricerca straordinariamente pionieristica sulla natura ultima della materia Rutherford ricevette il premio Nobel per la chimica nel 1908.

Divenne così possibile descrivere gli atomi dei vari elementi e il loro comportamento in termini più definiti. Per esempio, l'atomo d'idrogeno possiede un solo elettrone; se questo gli viene sottratto, il protone rimasto si lega immediatamente a una molecola vicina; se però il nucleo nudo dell'idrogeno non trova un elettrone da condividere con un'altra molecola, si comporta come un protone - cioè, come una particella subatomica - e in tale forma può penetrare nella materia, reagendo con altri nuclei, se ha abbastanza energia.

L'elio, che ha due elettroni, non ne cede uno tanto facilmente. Come già ho detto nel capitolo precedente, i suoi due elettroni formano un «guscio» completo, e per questa ragione l'atomo è inerte. Se si spoglia, però, un atomo di elio di entrambi gli elettroni, esso diviene una particella alfa, cioè una particella subatomica avente due unità di carica positiva.

Il terzo elemento, il litio, ha tre elettroni; se si sottraggono al suo atomo uno o due elettroni, esso diventa uno ione; se invece si sottraggono tutti e tre, diventa anch'esso un nucleo nudo, avente una carica positiva di tre unità.

Il numero delle unità di carica positiva del nucleo di un atomo deve essere esattamente uguale al numero degli elettroni che esso contiene normalmente, perché l'atomo nel suo insieme è solitamente neutro. In effetti i numeri atomici degli elementi sono basati sul numero delle cariche positive (e non di quelle negative), perché il numero degli elettroni di un atomo può essere modificato con facilità, dando origine a uno ione, mentre il numero dei protoni può essere alterato solo con grande difficoltà.

Si era appena giunti a tracciare questo schema della struttura dell'atomo allorché ci si imbatté in un nuovo enigma. Il numero delle unità di carica positiva di un nucleo, moltiplicato per la massa del protone, non dava affatto la massa del nucleo, salvo nel caso dell'idrogeno. Il nucleo dell'elio, per esempio, aveva una carica positiva pari a due, eppure si sapeva che la sua massa era quadrupla di quella del nucleo dell'idrogeno. E la situazione peggiorava sempre più via via che si percorreva la tavola periodica, fino a raggiungere l'uranio, con una massa pari a 238 protoni, ma una carica pari solo a 92.

Come poteva un nucleo contenente quattro protoni (come si supponeva fosse il nucleo di elio) avere solo due unità di carica positiva? La supposizione più semplice e più immediata era che due unità della sua carica fossero neutralizzate dalla presenza nel nucleo di particelle cariche negativamente, aventi una massa trascurabile. Era naturale pensare agli elettroni. Si poteva risolvere l'enigma supponendo che il nucleo di elio consistesse di quattro protoni e di due elettroni che neutralizzavano due cariche positive, dando come risultato una carica positiva pari a due - e tale ipotesi poteva essere estesa a tutta la tavola periodica fino all'uranio, il cui nucleo avrebbe avuto quindi 238 protoni e 146 elettroni, il che dà come differenza una carica positiva pari a 92. Il fatto che, come si sapeva, i nuclei radioattivi emettessero elettroni, cioè particelle beta, rafforzava la plausibilità di questa supposizione.

Questa concezione della struttura della materia prevalse per più di dieci anni, fino al giorno in cui altre ricerche fornirono indirettamente una risposta più valida. Nel frattempo, però, erano sorte alcune serie obiezioni a tale concezione. In primo luogo, se il nucleo era costituito essenzialmente da protoni, mentre gli elettroni, più leggeri, in pratica non contribuivano alla massa, come mai le masse relative dei vari nuclei non erano espresse da numeri interi?

Per esempio, in base ai pesi atomici misurati, il nucleo dell'atomo di cloro aveva una massa pari a 35,5 volte quella del nucleo dell'idrogeno; conteneva forse 35 protoni e mezzo? Nessuno scienziato, né allora né oggi, potrebbe accettare l'idea di un mezzo protone.

Questo problema in particolare ha avuto una risposta che fu trovata prima della soluzione del problema più generale. Vale la pena di raccontare tutta la storia.

ISOTOPI.

MATTONI UNIFORMI.

Già nel 1816 un medico inglese, William Prout, aveva proposto che tutti gli atomi fossero composti di atomi di idrogeno. In seguito, quando si arrivò a calcolare i pesi atomici, la teoria di Prout venne messa da parte, perché si era scoperto che molti elementi avevano pesi frazionari (prendendo come base l'ossigeno posto uguale a 16). Il cloro ha peso atomico 35,453; altri esempi sono l'antimonio: 121,75; il bario: 137,34; il boro: 10,811; il cadmio: 112,40.

Attorno alla fine del diciannovesimo secolo venne accumulandosi una serie di sconcertanti osservazioni, che dovevano portare alla spiegazione. L'inglese William Crookes (quello del tubo di Crookes) separò dall'uranio una piccola quantità di una sostanza che si dimostrò assai più radioattiva dell'uranio stesso; egli avanzò l'ipotesi che l'uranio in se stesso non fosse affatto radioattivo - lo sarebbe stata solo questa impurità, che egli chiamò "uranio X". Henri Becquerel, d'altro canto, scoprì che l'uranio purificato, debolmente radioattivo, con il tempo sviluppava in qualche modo una radioattività crescente. Dopo averlo lasciato a se stesso per un po' di tempo, se ne poteva estrarre dell'uranio X attivo; e questo ripetutamente. In altri termini, l'uranio veniva trasformato dalla sua stessa radioattività nell'uranio X, ancora più attivo.

Poi Rutherford separò analogamente dal torio il "torio X", fortemente radioattivo, scoprendo che anche il torio col tempo produceva sempre più torio X. Già si sapeva che l'elemento radioattivo più famoso di tutti, il radio, si disintegrava, dando origine al gas radioattivo rado. Così Rutherford e il suo assistente, il chimico Frederick Soddy, giunsero alla conclusione che gli atomi radioattivi, emettendo delle particelle, si trasformavano, in generale, in nuove varietà di atomi radioattivi.

I chimici si misero ad analizzare queste trasformazioni e scoprirono una gran varietà di sostanze nuove, a cui diedero nomi come "radio A", "radio B", "mesotorio primo", "mesotorio secondo" e "attinio C".

Queste sostanze vennero raggruppate in tre famiglie o serie, a seconda del loro capostipite radioattivo: una serie proveniva dalla disintegrazione dell'uranio, un'altra da quella del torio e una terza da quella dell'attinio (in seguito si trovò che lo stesso attinio aveva un predecessore, che fu chiamato "protoattinio"). In tutto venne identificata una quarantina di membri di queste famiglie, ciascuno contraddistinto dal suo tipo particolare di radiazione; ma il prodotto finale delle tre serie era lo stesso; ciascuna delle tre catene di sostanze finiva nello stesso elemento stabile: il piombo.

Era ovvio che tutte queste sostanze non potevano essere elementi distinti, perché tra l'uranio (92) e il piombo (82) vi erano solo dieci posti nella tavola periodica, e per di più questi, salvo due, erano già occupati da elementi noti. E infatti i chimici trovarono che alcune di queste sostanze, pur avendo una diversa radioattività, erano identiche dal punto di vista chimico. Per esempio, già nel 1907 i chimici americani Herbert Newby McCoy e William Horace Ross avevano mostrato che il "radiotorio", uno dei prodotti della disintegrazione del torio, presentava esattamente lo stesso comportamento chimico del torio. Il "radio D" si comportava dal punto di vista chimico esattamente come il piombo, tanto che spesso veniva chiamato "radiopiombo". Tutto ciò faceva pensare che le sostanze in questione fossero in realtà varietà di uno stesso elemento: il radiotorio, una forma di torio; il radiopiombo, una delle varietà del piombo; e così via.

Nel 1913, Soddy espresse quest'idea in modo chiaro e la sviluppò ulteriormente, sostenendo che un atomo, quando emette una particella alfa, si trasforma in un elemento situato due posti più indietro nell'elenco degli elementi, mentre, quando emette una particella beta, si trasforma in un elemento situato un posto più in avanti. Su questa base, il radiotorio doveva effettivamente rientrare nella casella del torio, e altrettanto dovevano fare le sostanze che erano state denominate "uranio X1" e "uranio Y", essendo tutte e tre delle varietà dell'elemento 90. Analogamente, il radio D, il radio B, il torio B e l'attinio B dovevano rientrare tutti nella casella del piombo, in quanto varietà dell'elemento 82.

Ai membri di un gruppo di sostanze che occupano una stessa casella nella tavola periodica, Soddy diede il nome di "isotopi" (dalle parole greche che significano «stessa posizione»); Soddy ricevette il premio Nobel per la chimica nel 1921.

Il modello del nucleo protone-elettrone (che doveva invece in seguito risultare erroneo) concordava assai bene con la teoria degli isotopi avanzata da Soddy. Sottraendo una particella alfa a un nucleo, si riduceva di due unità la sua carica positiva - esattamente quello che ci voleva per farlo retrocedere di due posti nella tavola. Se invece veniva emesso dal nucleo un elettrone (cioè una particella beta), rimaneva non neutralizzato un protone in più, il che faceva aumentare di un'unità la carica positiva del nucleo. L'effetto era di elevare di uno il numero atomico, e quindi di far spostare l'elemento di un posto in avanti nella tavola periodica.

Come può accadere, allora, che, quando il torio decade in radiotorio, dopo aver subìto non una, ma tre disintegrazioni, il prodotto finale sia ancora torio? Vediamo di dare una spiegazione: in questo processo l'atomo di torio perde una particella alfa, poi una particella beta, poi una seconda particella beta. Se accettiamo l'idea del protone come mattone costitutivo del nucleo, l'atomo di torio ha perso quattro elettroni (supponendo che due ne fossero contenuti nella particella alfa) e quattro protoni. (La situazione reale è un poco diversa da questa, ma non tanto da influire sul risultato finale.) Il nucleo di torio era partito con 232 protoni e 142 elettroni (almeno così si era supposto). Avendo perso quattro protoni e quattro elettroni, esso è ridotto a 228 protoni e 138 elettroni; in entrambi i casi il numero dei protoni non controbilanciati è sempre 90 (cioè 232 meno 142, oppure 228 meno 138), il che significa che il numero atomico rimane invariato, cioè 90. Pertanto il radiotorio, come il torio, ha novanta elettroni planetari che girano intorno al nucleo. Dato che le proprietà chimiche di un atomo sono condizionate dal numero dei suoi elettroni periferici, il torio e il radiotorio hanno lo stesso comportamento chimico, a prescindere dal loro diverso peso atomico (232 e 228 rispettivamente).

Gli isotopi di un elemento sono identificati dal loro peso atomico, o "numero di massa". Così, il torio ordinario viene chiamato "torio 232", mentre il radiotorio è il "torio 228". Analogamente, gli isotopi radioattivi del piombo sono chiamati "piombo 210" (radio D), "piombo 214" (radio B), "piombo 212" (torio B) e "piombo 211" (attinio B).

È poi risultato che il concetto di isotopia vale anche per gli elementi stabili, e non solo per quelli radioattivi. Per esempio, si è trovato che le tre famiglie radioattive che ho menzionato sopra terminavano in tre forme diverse di piombo. La famiglia dell'uranio terminava col piombo 206, quella del torio col piombo 208 e quella dell'attinio col piombo 207, ciascuno dei quali era un isotopo «ordinario», stabile, del piombo, che differiva dagli altri due per il peso atomico.

La dimostrazione dell'esistenza degli isotopi stabili si ottenne mediante un dispositivo inventato da un assistente di J. J. Thomson, Francis William Aston. Tale dispositivo separava molto selettivamente gli isotopi in virtù della diversa deflessione subita dai loro ioni per effetto di un campo magnetico; Aston lo chiamò "spettrografo di massa". Nel 1919, usando una prima versione di questo strumento, Thomson dimostrò che il neon era costituito di atomi di due varietà, una con numero di massa 20, l'altra con numero di massa 22. Il neon 20 era l'isotopo più comune, presente nel rapporto di 10 a 1 con il neon 22. (In seguito fu scoperto un terzo isotopo, il neon 21, presente nel neon dell'atmosfera nella proporzione di un solo atomo su 400.)

Ora diventava finalmente chiara la ragione per cui i pesi atomici degli elementi erano frazionari. Il peso atomico del neon - 20,183 - rappresentava la massa media dei tre diversi isotopi che costituiscono l'elemento, così come si trova in natura. Ogni singolo atomo ha un numero di massa intero, ma il numero di massa medio - che è poi il peso atomico - è frazionario.

Aston proseguì dimostrando che parecchi elementi stabili comuni in realtà erano miscugli di isotopi. Scoprì, per esempio, che il cloro, con un peso atomico frazionario di 35,453, era costituito di cloro 35 e cloro 37, le cui "abbondanze relative" sono nel rapporto di 3 a 1. Ad Aston per il suo lavoro fu assegnato il premio Nobel per la chimica nel 1922.

Nel discorso tenuto in occasione del conferimento del premio, Aston prospettò chiaramente la possibilità di far uso dell'energia contenuta nel nucleo dell'atomo, prevedendo sia le centrali nucleari che le bombe nucleari (vedi capitolo decimo). Nel 1935, il fisico canadese- americano Arthur Jeffrey Dempster, usando lo strumento ideato da Aston, compì un notevole passo avanti in

tale direzione: egli mostrò che, su ogni 1000 atomi di uranio, 993 erano di uranio 238, mentre gli altri 7 erano di uranio 235. Si trattava di una scoperta gravida di conseguenze, che si rivelarono a pieno poco tempo dopo.

Così, dopo un secolo di piste false, l'intuizione di Prout veniva alfine rivalutata. Gli elementi sono effettivamente costruiti con mattoni tutti uguali - se non proprio con atomi di idrogeno, con unità aventi la massa dell'atomo di idrogeno. La ragione per cui gli elementi non manifestano in modo evidente questa realtà nei loro pesi atomici è che essi sono miscele di isotopi, contenenti numeri differenti di «mattoni». Perfino l'ossigeno, il cui peso atomico, posto uguale a 16, era servito come riferimento per misurare i pesi relativi degli elementi, non costituisce un caso del tutto puro: su ogni 10 mila atomi del comune ossigeno 16, vi sono 20 atomi di un isotopo con numero di massa 18 e 4 con numero di massa 17.

Esistono in realtà pochissimi elementi che sono costituiti da un "solo isotopo". (In questo caso la denominazione è inappropriata, come se si parlasse di una donna che ha dato alla luce «un solo gemello».) Tali elementi sono: il berillio, i cui atomi hanno tutti numero di massa 9; il fluoro, costituito esclusivamente da fluoro 19; l'alluminio, che è solo alluminio 27, e pochi altri ancora. Un nucleo dotato di una data struttura oggi viene chiamato "nuclide", seguendo il suggerimento avanzato nel 1947 dal chimico americano Truman Paul Kohman. Sarebbe quindi appropriato dire che un elemento come l'alluminio è fatto di un solo nuclide.

SULLE TRACCE DELLE PARTICELLE.

Fin da quando Rutherford aveva identificato la prima particella nucleare (la particella alfa), i fisici si erano messi a frugare all'interno del nucleo, nel tentativo o di trasformare un atomo in un altro atomo o di spezzarlo, per vedere di cosa fosse fatto. Sulle prime avevano solo la particella alfa con cui lavorare; Rutherford ne fece un uso eccellente.

Uno degli esperimenti più fruttuosi di Rutherford e dei suoi assistenti consisteva nello sparare le particelle alfa contro uno schermo rivestito di solfuro di zinco: ogni impatto produceva una minuscola scintillazione (un effetto scoperto da Crookes nel 1903) e quindi l'arrivo di ogni singola particella poteva essere osservato e contato a occhio nudo. Sviluppando questa tecnica, gli sperimentatori collocarono un disco di metallo in modo che impedisse alle particelle alfa di raggiungere lo schermo, interrompendo la scintillazione.

Quando introdussero idrogeno nell'apparecchiatura, sullo schermo comparvero delle scintillazioni, nonostante la presenza del disco di metallo; inoltre queste nuove scintillazioni avevano un aspetto differente da quelle prodotte dalle particelle alfa. Dato che il disco metallico bloccava le particelle alfa, doveva esser stata qualche altra radiazione ad attraversarlo, raggiungendo lo schermo. Si finì per concludere che tale radiazione doveva consistere di protoni veloci. In altri termini, ogni tanto qualche particella alfa centrava il nucleo di un atomo di idrogeno (che, si ricordi, è fatto di un protone) proiettandolo in avanti, come una palla da biliardo che ne colpisca un'altra. I protoni colpiti, essendo relativamente leggeri, sfrecciavano in avanti a grande velocità, riuscendo ad attraversare il disco metallico e a colpire lo schermo rivestito di solfuro di zinco.

La rivelazione di singole particelle con il metodo appena descritto costituisce un esempio di "contatore a scintillazione". Per effettuare accuratamente i loro conteggi, Rutherford e i suoi assistenti dovevano prima star seduti una quindicina di minuti al buio per sensibilizzare gli occhi. I moderni contatori a scintillazione non dipendono più dall'occhio e dalla mente umani, ma convertono le scintillazioni in impulsi elettrici, che vengono poi contati elettronicamente. Il risultato finale si legge direttamente su un apposito quadrante.

Quando le scintillazioni sono molto frequenti, si può semplificare l'operazione ricorrendo a circuiti elettrici che fanno in modo che venga registrata solo una scintillazione su due o su quattro (o anche più). Questi demoltiplicatori furono ideati dal fisico inglese Charles Eryl Wynn-Williams

nel 1931. Dopo la seconda guerra mondiale, il solfuro di zinco è stato sostituito da certe sostanze organiche che si sono dimostrate preferibili.

Negli esperimenti originari di Rutherford con le scintillazioni si verificò uno sviluppo imprevisto. Quando venne usato l'azoto al posto dell'idrogeno come bersaglio per il bombardamento delle particelle alfa, lo schermo di solfuro di zinco diede origine a scintillazioni esattamente uguali a quelle prodotte dai protoni, obbligando Rutherford a dedurne che il bombardamento aveva espulso dei protoni dai nuclei di azoto.

Per cercare di capire cosa esattamente fosse successo, Rutherford ricorse alla "camera a nebbia", o "camera di Wilson", un'apparecchiatura inventata nel 1895 dal fisico scozzese Charles Thomson Rees Wilson. Un recipiente di vetro in cui scorre a tenuta uno stantuffo viene riempito di aria satura di vapore; quando si solleva lo stantuffo, l'aria si espande di colpo, raffreddandosi; a causa della diminuzione di temperatura, essa risulta soprassatura di vapore: in queste condizioni, ogni particella carica farà condensare su di sé il vapore acqueo: una particella che attraversi velocemente la camera, ionizzando gli atomi contenuti, lascerà una scia formata da una linea nebbiosa di goccioline.

La natura di questa traccia può dire molte cose sulla particella. Le particelle beta, che sono leggere, lasciano una traccia debole e sinuosa: una particella beta risente anche del semplice passaggio in vicinanza di altri elettroni. La particella alfa, di massa molto maggiore, lascia una traccia diritta e più spessa. Se colpisce un nucleo, la particella rimbalza e la traccia subisce una brusca deflessione; se cattura due elettroni, diventa un atomo neutro di elio, e la traccia termina. Oltre allo spessore e alle caratteristiche della sua traccia, vi sono altri fattori che permettono di identificare una particella nella camera a nebbia. La sua risposta a un campo magnetico dice se essa è carica positivamente o negativamente, e la curvatura della traiettoria ne indica massa ed energia. Oggigiorno i fisici hanno una tale familiarità con le fotografie di tutti i tipi di tracce che possono leggerle come se fossero scritte a chiare lettere. Per lo sviluppo della camera a nebbia, Wilson ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1927.

La camera a nebbia ha subìto successivamente varie modificazioni, che hanno portato a strumenti che si possono comunque considerare come sue varianti. La camera a nebbia originale non era utilizzabile a lungo dopo l'espansione se non si ricreavano le condizioni di partenza; nel 1939, negli Stati Uniti, Alexander Langsdorf ideò una "camera di ionizzazione a diffusione", in cui vapore caldo di alcool veniva fatto diffondere in una regione più fredda, in modo che ci fosse sempre una regione soprassatura; così le tracce si potevano osservare con continuità.

Successivamente fu messa a punto la "camera a bolle", un'apparecchiatura che si basa sullo stesso principio: al posto del vapore soprassaturo si usano ora dei liquidi surriscaldati sotto pressione. Il percorso della particella carica è indicato da una serie di bollicine di vapore nel liquido, anziché da goccioline liquide nel vapore. Si dice che l'inventore, il fisico americano Donald Arthur Glaser, ne abbia avuto l'idea nel 1953, osservando un bicchiere di birra. Se così è stato, si tratta di un bicchiere di birra davvero fortunato per il mondo della fisica e per Glaser stesso, che per tale invenzione ricevette il premio Nobel nel 1960.

La prima camera a bolle aveva un diametro di pochi centimetri; dieci anni dopo erano in uso camere a bolle lunghe quasi due metri. Le camere a bolle, come le camere di ionizzazione a diffusione, sono sempre pronte all'uso; in più, siccome gli atomi presenti in un dato volume di liquido sono molto più numerosi di quelli presenti nello stesso volume di gas, in una camera a bolle vengono prodotti più ioni; pertanto essa è particolarmente adatta per lo studio delle particelle veloci e a breve vita media. Nel giro di una decina di anni dalla loro invenzione, le camere a bolle producevano centinaia di migliaia di fotografie alla settimana. Negli anni sessanta sono state scoperte particelle dalla vita ultra-corta, che sarebbero passate inosservate senza la camera a bolle.

L'idrogeno liquido è eccellente per riempire le camere a bolle, perché il nucleo dell'idrogeno, con il suo unico protone, comporta il minimo di complicazioni. Nel 1973 è stata

costruita a Wheaton, nell'lllinois, una camera a bolle del diametro di quasi cinque metri, che conteneva 33 mila litri di idrogeno liquido. Alcune camere a bolle contengono elio liquido.

La camera a bolle, pur essendo più sensibile della camera a nebbia alle particelle di vita media breve, ha i suoi inconvenienti. A differenza della camera a nebbia, essa non è selettiva, cioè registra indiscriminatamente tutti gli eventi che si verificano; pertanto si devono ricercare le tracce significative in mezzo a una gran quantità di tracce inutili. Ci si mise allora alla ricerca di un metodo che combinasse la selettività della camera a nebbia con la sensibilità della camera a bolle.

Questi requisiti furono alfine assicurati dalla "camera a scintille", in cui le particelle in arrivo ionizzano il gas neon presente e, dal momento che questo è attraversato da parecchi elettrodi metallici, vi generano delle correnti elettriche. Le correnti si rendono visibili come scie di scintille, che indicano il passaggio delle particelle; è possibile fare in modo che l'apparecchio reagisca solo al tipo di particelle che si sta studiando. La prima camera a scintille efficiente fu costruita nel 1959 dai fisici giapponesi Saburo Fukui e Shotaro Miyamoto. Nel 1963, i fisici sovietici la perfezionarono, elevandone la sensibilità e la flessibilità. Si producono delle brevi scariche luminose, che, viste globalmente, formano una linea praticamente continua (e non più delle scintille isolate, come nel caso della camera a scintille). L'apparecchiatura così modificata è una "camera a scarica", ed è in grado di rivelare sia eventi che si verificano nella camera, sia particelle che saettano in tutte le direzioni, laddove la camera a scintille originaria era insoddisfacente sotto entrambi gli aspetti.

LA TRASMUTAZIONE DEGLI ELEMENTI.

Lasciando da parte le tecniche sofisticate più moderne per lo studio delle tracce delle particelle subatomiche, ora dobbiamo tornare indietro di mezzo secolo per vedere cosa accadde quando Rutherford bombardò i nuclei di azoto con le particelle alfa in una delle originarie camere a nebbia di Wilson. La particella alfa lasciava una traccia che terminava improvvisamente con una biforcazione - evidentemente a causa di una collisione con un nucleo di azoto. Uno dei due rami era relativamente sottile, e rappresentava un protone sbalzato via. L'altro ramo, una traccia corta e grossa, rappresentava ciò che restava del nucleo di azoto che aveva subìto la collisione. Ma della particella alfa stessa non vi era alcuna traccia. Sembrava che dovesse esser stata assorbita dal nucleo di azoto, supposizione che fu in seguito confermata dal fisico inglese Patrick Maynard Stuart Blackett; si dice che questi abbia effettuato più di ventimila fotografie per arrivare a mettere insieme otto di tali collisioni (certamente un esempio di pazienza, fede e tenacia sovrumane). Per questo e altri lavori nel campo della fisica nucleare, Blackett ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1948.

A quel punto era possibile ricostruire cosa fosse successo al nucleo di azoto: catturando una particella alfa, il suo numero di massa saliva da 14 a 18 e la sua carica positiva da 7 a 9; dato però che la combinazione espelleva immediatamente un protone, il numero di massa ridiscendeva a 17 e la carica positiva a 8. Ora, l'elemento di carica positiva 8 è l'ossigeno, mentre il numero di massa 17 individua l'isotopo dell'ossigeno 17. In altri termini, Rutherford, nel 1919, aveva trasmutato l'azoto in ossigeno. Si trattava della prima trasmutazione artificiale della storia umana. Il sogno degli alchimisti era stato realizzato, anche se in una maniera che essi non avrebbero potuto né prevedere né attuare con le loro tecniche primitive.

Come proiettili, le particelle alfa ottenute dalle sorgenti radioattive presentavano dei limiti: non avevano certo abbastanza energia per riuscire a penetrare nei nuclei degli elementi più pesanti, le cui elevate cariche positive esercitano una forte repulsione sulle particelle cariche positivamente. Ma la fortezza del nucleo era stata violata, e attacchi più energici sarebbero seguiti.

NUOVE PARTICELLE.

Il problema dell'attacco al nucleo ci riporta all'altra questione, quella della struttura del nucleo stesso. L'ipotesi protone-elettrone, pur spiegando perfettamente l'isotopia, era in contrasto con alcuni altri fatti. Le particelle subatomiche in generale hanno una proprietà che viene chiamata "spin", in qualche modo analoga alla rotazione assiale degli oggetti astronomici. Questo spin viene misurato in unità scelte in modo che protoni ed elettroni risultino avere spin o + 1 su 2 o meno 1 su 2. Pertanto, un numero pari di elettroni o di protoni (o di entrambi), contenuti tutti in uno stesso nucleo, gli conferirà uno spin uguale a zero o a un numero intero: + 1, meno 1, + 2, meno 2 e così via. Se il nucleo è invece formato da un numero dispari di elettroni, di protoni o di entrambi, lo spin totale sarà un numero semintero, come + 1 su 2, meno 1 su 2, + 1 e mezzo, meno 1 e mezzo, + 2 e mezzo, meno 2 e mezzo, e così via. Se provate a fare la somma prima di un numero pari e poi di un numero dispari di metà positive e/o negative, vedrete che le cose vanno per forza così.

Ora si dava il caso che il nucleo di azoto avesse carica positiva + 7 e massa 14. Secondo la teoria protone-elettrone, il suo nucleo avrebbe dovuto contenere 14 protoni per render conto della massa e 7 elettroni per neutralizzare metà della carica, in modo che essa risultasse + 7.

Pertanto il numero complessivo delle particelle in tale nucleo sarebbe dovuto essere pari a 21, e lo spin totale sarebbe dovuto essere un numero semintero. Ma non è così. Lo spin del nucleo dell'atomo di azoto è un numero intero.

Analoghe discrepanze furono riscontrate anche in altri nuclei, cosicché la teoria protone-elettrone apparve decisamente inadeguata.

Ma fintantoché i fisici non conoscevano altre particelle subatomiche, era assai difficile che potessero escogitare una teoria sostitutiva.

IL NEUTRONE.

Tuttavia, nel 1930, due fisici tedeschi, Walther Bothe e Herbert Becker, riferirono di aver causato l'emissione da parte del nucleo di una nuova radiazione misteriosa, eccezionalmente penetrante. Tale radiazione era stata ottenuta bombardando atomi di berillio con particelle alfa. L'anno prima, Bothe aveva ideato dei metodi per usare due o più contatori congiuntamente nei "conteggi a coincidenza".

Grazie a essi si potevano individuare eventi nucleari che avvenivano in un milionesimo di secondo. Per questo e altri contributi egli ebbe il premio Nobel per la fisica nel 1954.

Due anni dopo la scoperta di Bothe e Becker, una scoperta analoga fu fatta dai fisici francesi Frédéric e Irène Joliot-Curie. (Irène era la figlia di Pierre e Marie Curie, e Joliot, sposandola, aveva aggiunto al proprio il cognome Curie.) Essi avevano usato la radiazione scoperta di recente, emessa dal berillio, per bombardare la paraffina, una sostanza simile alla cera, composta di idrogeno e carbonio. La radiazione espelleva protoni dalla paraffina.

Il fisico inglese James Chadwick pensò subito che la radiazione fosse costituita di particelle. Per determinare le loro dimensioni, bombardò degli atomi di boro con tali particelle e calcolò, in base all'aumento della massa del nuovo nucleo formatosi, che la massa della particella aggiunta al boro sarebbe dovuta essere circa uguale a quella del protone. Eppure tale particella non era osservabile in una camera di Wilson. Chadwick giunse alla conclusione che la particella fosse priva di carica elettrica; infatti in tal caso non avrebbe prodotto ionizzazione e per questa ragione non si sarebbe verificata la condensazione delle goccioline di acqua.

Così Chadwick stabilì che si era in presenza di una particella completamente nuova - che aveva circa la stessa massa del protone, ma era priva di carica, ossia elettricamente neutra. Da tempo era stata presa in considerazione la possibilità che esistesse una simile particella, per la quale era stato anche proposto un nome: "neutrone". Chadwick accettò tale nome. Per la scoperta del neutrone gli fu conferito il premio Nobel per la fisica nel 1935.

La nuova particella risolse subito vari problemi che avevano indotto i fisici teorici a dubitare del modello protone-elettrone proposto per il nucleo. Il fisico teorico tedesco Werner Heisenberg

confermò che l'idea di un nucleo costituito da protoni e neutroni, anziché da protoni ed elettroni, forniva uno schema esplicativo molto più soddisfacente; per esempio, si poteva concepire il nucleo dell'azoto come costituito di sette protoni e sette neutroni, il che avrebbe dato come numero di massa 14 e come carica totale (numero atomico) + 7.

Inoltre, il numero totale delle particelle del nucleo sarebbe stato quattordici - un numero pari - anziché ventuno (un numero dispari), com'era nella teoria precedente. Dato che il neutrone, come il protone, ha spin + 1 su 2 o meno 1 su 2, un numero pari di neutroni e protoni avrebbe comportato per il nucleo dell'azoto uno spin intero, in accordo con i fatti osservati. Tutti i nuclei con spin che non si potevano spiegare con la teoria protone-elettrone, risultarono dotati di spin in accordo con la teoria protone-neutrone. La teoria protoneneutrone fu subito accettata e nessuno l'ha più messa seriamente in discussione; all'interno del nucleo non ci sono dunque elettroni.

Inoltre, il nuovo modello offriva - al pari del vecchio - un ottimo accordo con la tavola periodica degli elementi. Il nucleo dell'elio, per esempio, veniva ora a essere costituito da due protoni e due neutroni, il che spiegava la sua massa uguale a 4 e la sua carica nucleare pari a 2 unità. Il modello spiegava anche l'esistenza degli isotopi nel modo più semplice: per esempio, il nucleo del cloro 35, secondo la nuova teoria, era formato da 17 protoni e 18 neutroni, e quello del cloro 37 da 17 protoni e 20 neutroni. Entrambi avevano, quindi, la stessa carica nucleare, e il peso aggiuntivo dell'isotopo più pesante era spiegato dai due neutroni in più. Analogamente, i tre isotopi dell'ossigeno differivano solo per il numero di neutroni: l'ossigeno 16 aveva 8 protoni e 8 neutroni, l'ossigeno 17 ne aveva rispettivamente 8 e 9; l'ossigeno 18 aveva 8 protoni e 10 neutroni.

In breve, ogni elemento poteva essere definito semplicemente dal numero dei protoni del suo nucleo, che è equivalente al numero atomico. Ma tutti gli elementi, salvo l'idrogeno, contenevano nel nucleo anche dei neutroni: il numero di massa del nuclide era pari alla somma dei suoi protoni e dei suoi neutroni. Così, il neutrone si aggiungeva al protone come mattone costitutivo fondamentale della materia. Per comodità, oggi li si indica con la comune denominazione di "nucleoni", termine che fu usato per la prima volta nel 1941 dal fisico danese Christian Moller, e dal quale è poi derivato anche il termine "nucleonica", proposto nel 1944 dall'ingegnere americano Zay Jeffries per la scienza e la tecnologia relative al nucleo.

Questa nuova comprensione della struttura nucleare ha portato a una nuova classificazione dei nuclidi. Come abbiamo visto, nuclidi aventi un numero uguale di protoni sono isotopi; nuclidi con lo stesso numero di neutroni sono "isotoni". (Ne sono un esempio l'idrogeno 2 e l'elio 3, che hanno ciascuno un solo neutrone nel nucleo.) Nuclidi che hanno lo stesso numero totale di nucleoni e pertanto uguale numero di massa - come il calcio 40 e l'argo 40 - sono "isobari".

La teoria protone-neutrone, in un primo tempo, lasciava però inspiegato il fatto che i nuclei radioattivi potessero emettere particelle beta, cioè elettroni. Da dove venivano questi elettroni, se nel nucleo non ce n'erano? Ma anche questo problema trovò la sua soluzione, come chiarirò brevemente.

IL POSITRONE.

La scoperta del neutrone deluse i fisici sotto un aspetto molto importante. Prima, essi avevano potuto concepire l'universo come costituito di due sole particelle fondamentali - il protone e l'elettrone -; ora se ne doveva aggiungere una terza. E ogni rinuncia alla semplicità è spiacevole per gli scienziati.

Ma questo non era che il principio, come risultò in seguito. Quel passo indietro sulla strada della semplicità si tramutò ben presto in una rotta precipitosa: molte altre particelle dovevano essere scoperte.

I fisici studiavano già da parecchi anni i misteriosi "raggi cosmici" provenienti dallo spazio, scoperti nel 1911 dal fisico austriaco Victor Francis Hess durante i suoi voli in pallone nell'alta atmosfera.

La presenza di tale radiazione fu rivelata con uno strumento la cui estrema semplicità potrebbe rincuorare chi crede che la scienza necessiti sempre di apparecchiature terribilmente complicate. Lo strumento era un comune "elettroscopio", costituito di due sottili foglie d'oro sospese a un'asta metallica all'interno di una scatola pure metallica dotata di finestre. (Tale strumento si può considerare una derivazione di quello costruito dal fisico inglese Francis Hauksbee, addirittura nel 1706.)

Se si carica l'asta metallica dell'elettroscopio di elettricità statica, le due lamine d'oro si allontanano. In teoria, dovrebbero restare così per sempre, ma gli ioni presenti nell'atmosfera circostante, rendendo quest'ultima conduttrice, fanno lentamente perdere la carica all'oro, e le due lamine si riavvicinano. Le radiazioni ad alta energia - come i raggi X, i raggi gamma o i fasci di particelle cariche - producono gli ioni necessari per questa dispersione di carica. Anche se l'elettroscopio è ben schermato, sussiste una perdita lenta, che indica la presenza di una radiazione molto penetrante, non direttamente associata alla radioattività. Era questa radiazione penetrante a crescere d'intensità via via che Hess ascendeva nell'atmosfera. Per questa scoperta, Hess ebbe il premio Nobel per la fisica nel 1936.

Il fisico americano Robert Andrews Millikan, che raccolse un gran numero di informazioni su queste radiazioni (e diede loro il nome di "raggi cosmici", stabilì che doveva trattarsi di una forma di radiazione elettromagnetica. Il suo potere di penetrazione era tale che parte di essa avrebbe potuto attraversare perfino lastre di piombo spesse qualche metro. A Millikan ciò fece pensare che la radiazione doveva essere simile ai penetranti raggi gamma, sebbene con una lunghezza d'onda ancora inferiore.

Altri, soprattutto il fisico americano Arthur Holly Compton, sostenevano invece che i raggi cosmici fossero costituiti da particelle. Esisteva un modo per risolvere il dilemma. Se si fosse trattato di particelle cariche, esse avrebbero dovuto essere deviate dal campo magnetico terrestre via via che, dallo spazio esterno, si avvicinavano alla terra. Compton analizzò le misurazioni della radiazione cosmica fatte a varie latitudini, e trovò che essa seguiva effettivamente il campo magnetico, essendo più debole vicino all'equatore magnetico e più forte vicino ai poli, dove le linee di forza magnetiche si immergono nella terra.

Quando penetrano nell'atmosfera, le particelle cosmiche primarie hanno energie eccezionalmente alte. Perlopiù si tratta di protoni, ma alcune sono nuclei di elementi più pesanti. In generale, più il nucleo è pesante, più esso è raro tra le particelle cosmiche. Nuclei complessi come quelli del ferro furono scoperti abbastanza presto; nel 1968, si trovarono anche nuclei complessi come quelli dell'uranio; questi ultimi erano nella proporzione di uno su 10 milioni di particelle. Si trovarono anche alcuni elettroni con energia molto elevata.

Quando le particelle primarie colpiscono gli atomi e le molecole dell'aria, mandano in pezzi i loro nuclei, dando origine a ogni sorta di particelle secondarie. È la radiazione secondaria (ancora molto energetica) quella che rileviamo in vicinanza della terra, mentre i palloni inviati negli strati superiori dell'atmosfera sono riusciti a registrare anche la radiazione primaria.

Ora, fu proprio in conseguenza della ricerca sui raggi cosmici che venne individuata (dopo il neutrone) un'altra nuova particella. Questa scoperta in realtà era stata prevista da un fisico teorico: Paul Adrien Maurice Dirac aveva concluso, in base a un'analisi matematica delle proprietà delle particelle subatomiche, che ogni particella doveva avere un'"antiparticella". (Gli scienziati vorrebbero che la natura fosse, oltre che semplice, anche simmetrica.) Dovevano dunque esistere un "antielettrone", esattamente uguale all'elettrone ma dotato di carica positiva anziché negativa, e un "antiprotone" con una carica negativa anziché positiva.

La teoria di Dirac non fece grande scalpore nel mondo scientifico quando egli la propose, nel 1930. Ma, due anni dopo, l'antielettrone saltò fuori davvero. Il fisico americano Carl David Anderson stava studiando con Millikan la questione se i raggi cosmici fossero radiazione elettromagnetica o particelle. A quell'epoca quasi tutti i fisici erano disposti ad accettare le prove portate da Compton a favore dell'ipotesi delle particelle cariche, ma Millikan non amava perdere, e

faceva di tutto perché la questione non fosse considerata chiusa. Anderson decise di verificare se i raggi cosmici, introdotti in una camera a nebbia, venissero deviati da un intenso campo magnetico. Per rallentare i raggi a sufficienza perché fosse osservabile una curvatura - se c'era - Anderson mise nella camera una barriera di piombo dello spessore di circa 6 millimetri: scoprì che la radiazione cosmica che attraversava la camera, dopo essere passata attraverso il piombo, presentava effettivamente una traccia curva. Ma scoprì anche qualcosa d'altro. Nell'attraversare la barriera, i raggi cosmici ad alta energia facevano schizzare fuori dagli atomi di piombo alcune particelle: una di esse diede origine a una traccia che era del tutto simile a quella di un elettrone, però s'incurvava nella direzione sbagliata! La stessa massa, ma carica opposta. Eccolo dunque, l'antielettrone di Dirac. Anderson diede alla particella appena scoperta il nome di "positrone": esso costituisce un esempio di radiazione secondaria prodotta dai raggi cosmici; nel 1963, però, si scoprì che i positroni si trovano anche nella radiazione primaria.

Lasciato a se stesso, il positrone è altrettanto stabile dell'elettrone (e perché non dovrebbe esserlo, visto che è identico, salvo per la carica elettrica?): esso può sussistere indefinitamente.

Tuttavia, non viene affatto lasciato a se stesso, perché viene a trovarsi in un universo pieno di elettroni; non appena sfreccia nello spazio, quasi immediatamente (diciamo, entro un milionesimo di secondo) si trova in vicinanza di uno di questi.

Per un istante può sussistere un'associazione elettrone-positrone, una situazione in cui le due particelle girano l'una intorno all'altra e attorno a un centro di forza comune. Nel 1945, il fisico americano Arthur Edward Ruark propose di chiamare questo sistema a due particelle "positronio", e nel 1951 il fisico austro-americano Martin Deutsch riuscì a rivelare la presenza del positronio in virtù della caratteristica radiazione gamma da esso emessa.

Tuttavia, il positronio, anche se si forma, resta in vita solo per un decimilionesimo di secondo, al massimo. La danza termina in un abbraccio fra elettrone e positrone. Quando questi due frammenti opposti di materia si combinano, si annullano reciprocamente, senza lasciare alcun residuo materiale ("mutua annichilazione"): ciò che resta è solo energia, sotto forma di raggi gamma. Veniva così confermata l'idea di Albert Einstein che si potesse convertire la materia in energia e viceversa. E infatti Anderson riuscì ben presto a osservare anche il fenomeno inverso, cioè l'improvvisa scomparsa di raggi gamma, con immediata formazione di una coppia elettrone-positrone. Questo fenomeno viene chiamato "produzione di una coppia". (Anderson condivise con Hess il premio Nobel per la fisica nel 1936.)

Poco tempo dopo, i Joliot-Curie si imbatterono nel positrone in un'altra situazione, facendo a loro volta un'importante scoperta. Bombardando atomi di alluminio con particelle alfa, essi videro che si ottenevano non solo dei protoni, ma anche dei positroni - cosa certo interessante, ma in se stessa non eccessivamente emozionante. Ma quando fecero cessare il bombardamento, l'alluminio seguitò a emettere positroni! L'emissione svanì lentamente col passare del tempo. Sembrava dunque che i due scienziati avessero creato nel bersaglio una nuova sostanza radioattiva.

I Joliot-Curie diedero la seguente interpretazione di quanto era successo: quando un nucleo di alluminio assorbiva una particella alfa, l'aggiunta di due protoni trasmutava l'alluminio (numero atomico 13) in fosforo (numero atomico 15). Dato che la particella alfa conteneva in tutto quattro nucleoni, il numero di massa era salito di quattro unità: si era cioè passati da alluminio 27 a fosforo 31. Ora, se la reazione espelleva un protone da questo nucleo, esso doveva trasformarsi in un altro elemento, cioè in silicio 30, in seguito alla riduzione di un'unità tanto del numero atomico che del numero di massa.

Dato che una particella alfa è un nucleo di elio e un protone è un nucleo di idrogeno, possiamo scrivere come segue l'equazione di questa reazione nucleare:

alluminio 27 + elio 4 genera silicio 30 + idrogeno 1.

Si noti la conservazione del numero di massa: 27 + 4 = 30 + 1. Altrettanto dicasi per i numeri atomici: 13 per l'alluminio, 2 per l'elio, totale 15; il numero atomico del silicio è 14 e quello dell'idrogeno 1, il che dà ancora un totale di 15. Questa conservazione sia del numero di massa che del numero atomico è una regola generale delle reazioni nucleari.

I Joliot-Curie supposero che nella reazione si fossero formati neutroni oltre che protoni. Se il fosforo 31 emettesse un neutrone anziché un protone, il numero atomico non cambierebbe, ma quello di massa scenderebbe di un'unità. In tal caso l'elemento, pur restando fosforo, diventerebbe fosforo 30. L'equazione corrispondente sarebbe la seguente:

alluminio 27 + elio 4 genera fosforo 30 + neutrone 1.

Dato che il numero atomico del fosforo è 15 e quello del neutrone è 0, anche qui i numeri atomici hanno somma costante nei due membri dell'equazione.

I due processi - l'assorbimento alfa seguito dall'emissione di un protone, e l'assorbimento alfa seguito dall'emissione di un neutrone - avvengono entrambi quando si bombarda l'alluminio con particelle alfa: ma nei due casi i prodotti finali sono assai differenti. Il silicio 30 è un ben noto isotopo del silicio, e ne costituisce in natura poco più del 3 per cento, mentre il fosforo 30 non esiste in natura. L'unica forma naturale nota del fosforo è il fosforo 31; in poche parole, il fosforo 30 è un isotopo radioattivo con vita media breve, che oggi esiste solo se lo si produce artificialmente; anzi, esso è stato il primo isotopo radioattivo prodotto in laboratorio. I Joliot-Curie ricevettero il premio Nobel per la chimica nel 1935 per la loro scoperta della radioattività artificiale.

Il fosforo 30 instabile prodotto dai Joliot-Curie bombardando l'alluminio si disintegrava rapidamente, emettendo positroni. Dato che questi ultimi, come gli elettroni, non hanno, in pratica, massa, questa emissione non cambiava il numero di massa del nucleo; ma la perdita di una carica positiva riduceva di uno il suo numero atomico, convertendo l'elemento da fosforo in silicio.

Da dove veniva il positrone? Era forse anch'esso un componente del nucleo? La risposta è negativa. Ciò che accade invece è che un protone del nucleo diventa un neutrone perdendo la sua carica positiva, che viene liberata sotto forma di un positrone veloce.

Ora l'emissione di particelle beta - l'enigma che abbiamo già incontrato in questo capitolo - poteva essere spiegata. Essa è il risultato di un processo che è esattamente l'inverso di quello con cui un protone decade in un neutrone. Cioè in questo caso è un neutrone che diventa un protone. Il decadimento protone-neutrone libera un positrone, e, per mantenere la simmetria, il decadimento neutrone-protone libera un elettrone, cioè una particella beta. Perdere una carica negativa equivale ad acquistare una carica positiva, e ciò spiega la formazione di un protone carico positivamente a partire da un neutrone privo di carica. Come fa, però, il neutrone privo di carica a procurarsi una carica negativa da emettere poi verso l'esterno?

In effetti, se si trattasse solo di una carica negativa, il neutrone non potrebbe produrla. Due secoli di esperienza hanno insegnato ai fisici che non si può creare dal nulla né una carica positiva né una carica negativa, così come non si può distruggere una carica dell'uno o dell'altro segno. È la legge di "conservazione della carica elettrica".

Ma il neutrone non crea soltanto un elettrone in questo decadimento beta: crea anche un protone. Il neutrone privo di carica scompare, e al suo posto restano un protone carico positivamente e un elettrone carico negativamente: "prese insieme", le due nuove particelle hanno una carica elettrica complessiva uguale a zero. A conti fatti, dunque, non è stata creata alcuna carica. Analogamente, quando un positrone e un elettrone si incontrano annichilandosi a vicenda, la loro carica "complessiva" è uguale a zero fin dall'inizio.

Quando un protone emette un positrone diventando un neutrone, la particella originaria (il protone) ha carica positiva e le particelle finali (il neutrone e il positrone), prese insieme, hanno carica positiva.

È anche possibile che un nucleo assorba un elettrone; quando ciò accade, un protone del nucleo si trasforma in un neutrone. Un elettrone più un protone (che insieme hanno carica zero) formano un neutrone, anch'esso con carica zero. L'elettrone catturato proviene dallo strato più interno dell'atomo, dato che gli elettroni di quello strato, essendo i più prossimi al nucleo, sono i più facili da catturare. E poiché lo strato più interno è quello K (vedi capitolo sesto), il processo viene detto "cattura K". In tal caso un elettrone dello strato L cade nel posto vacante, e viene emesso un raggio X.

Sono proprio questi raggi X a consentire di rivelare la cattura K, e questo fenomeno fu osservato per la prima volta nel 1938 dal fisico americano Luis Walter Alvarez. Le ordinarie reazioni nucleari interessano solo il nucleo e solitamente non sono influenzate dai cambiamenti chimici, i quali riguardano i soli elettroni. Dato che la cattura K interessa, oltre al nucleo, anche gli elettroni, la probabilità che si verifichi può essere in qualche misura alterata in seguito a mutamenti chimici.

Tutte queste interazioni tra particelle soddisfano la legge di conservazione della carica elettrica, e devono soddisfare anche altre leggi di conservazione. Qualsiasi interazione tra particelle che non violi alcuna legge di conservazione si verificherà, prima o poi - pensano i fisici - e un osservatore munito di strumenti opportuni e della necessaria pazienza finirà per rilevarla. Invece gli eventi che violano una legge di conservazione sono «proibiti» e non avranno luogo. Purtuttavia, i fisici di quando in quando scoprono con sorpresa che quella che era sembrata una legge di conservazione non è poi così ferrea o così universale come era parsa in un primo tempo. Su questo torneremo in seguito.

ELEMENTI RADIOATTIVI.

Dopo che i Joliot-Curie ebbero creato il primo isotopo radioattivo artificiale, i fisici si misero allegramente a produrne a legioni.

Ormai sono state realizzate in laboratorio varietà radioattive di ogni elemento della tavola periodica. Nella versione moderna di tale tavola, ogni elemento è, in realtà, una famiglia, con membri stabili e instabili, alcuni dei quali esistono in natura, mentre altri sono solo prodotti di laboratorio.

Per esempio, l'idrogeno esiste in tre varietà. Prima di tutto vi è l'idrogeno ordinario, quello che contiene solo un protone; nel 1932, il chimico Harold Urey riuscì a isolarne una seconda varietà, facendo evaporare lentamente una grande quantità d'acqua, nella convinzione che alla fine vi si sarebbe concentrata una forma di idrogeno più pesante, di cui si sospettava l'esistenza. E infatti, quando esaminò allo spettroscopio le ultime goccioline di acqua non evaporata, trovò una debole riga spettrale esattamente nella posizione prevista per l'"idrogeno pesante".

Il nucleo dell'idrogeno pesante è fatto di un protone e di un neutrone. Avendo numero di massa 2, l'isotopo è l'idrogeno 2, a cui Urey diede il nome di "deuterio", che in greco significa «secondo», mentre chiamò "deutone" il suo nucleo. Una molecola d'acqua contenente deuterio viene detta "acqua pesante". Dato che il deuterio ha massa doppia di quella dell'idrogeno ordinario, l'acqua pesante ha punti di ebollizione e di congelamento più elevati di quelli dell'acqua ordinaria. Mentre l'acqua ordinaria bolle a 100 gradi C e congela a 0 gradi C, l'acqua pesante bolle a 101,42 gradi C e congela a 3,79 gradi C. Lo stesso deuterio ha una temperatura di ebollizione di 23,7 gradi K, a fronte dei 20,4 gradi K dell'idrogeno ordinario. In natura il deuterio è presente nel rapporto di una parte su 6000 parti di idrogeno ordinario. Urey ricevette il premio Nobel per la chimica nel 1934, per la scoperta del deuterio.

Risultò che il deutone era una particella molto utile per il bombardamento dei nuclei. Nel 1934, il fisico australiano Marcus Lawrence Elwin Oliphant e il chimico austriaco Paul Harteck, bombardando lo stesso deuterio con deutoni, produssero una terza forma di idrogeno, fatta di un protone e di due neutroni. La reazione era la seguente:

idrogeno 2 + idrogeno 2 genera idrogeno 3 + idrogeno 1.

Il nuovo idrogeno «superpesante» venne chiamato "tritio", dalla parola greca che significa «terzo», e il suo nucleo "tritone". Il suo punto di ebollizione è 25,0 gradi K e il suo punto di fusione 20,5 gradi K.

È stato ottenuto anche ossido di tritio puro ("acqua superpesante"), il cui punto di fusione è a 4,5 gradi C. Il tritio è radioattivo e decade piuttosto rapidamente; esiste in natura, dato che si forma come prodotto del bombardamento dell'atmosfera da parte dei raggi cosmici.

Decadendo, esso emette un elettrone e si trasforma in elio 3, un isotopo stabile ma raro dell'elio, di cui abbiamo parlato nel capitolo precedente.

Nell'elio atmosferico, solo un atomo su 800 mila è elio 3; questo ha indubbiamente origine dal decadimento dell'idrogeno 3, cioè del tritio, che a sua volta si forma nelle reazioni nucleari causate dall'impatto dei raggi cosmici sugli atomi dell'atmosfera. Il tritio presente come tale in un qualsiasi istante è ancora più scarso: è stato calcolato che in tutta l'atmosfera e in tutti gli oceani ve ne sarebbero meno di due chilogrammi. Il contenuto di elio 3 nell'elio estratto dai pozzi di gas naturale, in cui i raggi cosmici hanno avuto minor opportunità di dare origine al tritio, è percentualmente ancora più basso.

Questi due isotopi, elio 3 ed elio 4, non sono gli unici esistenti: i fisici hanno creato due forme radioattive di elio: elio 5, uno dei nuclei più instabili che si conoscano, ed elio 6, anch'esso molto instabile.

E si potrebbe continuare: oggi l'elenco degli isotopi noti ha raggiunto un totale di circa 1400, più di 1100 dei quali sono radioattivi; molti di essi sono stati creati mediante nuove forme di bombardamento nucleare, assai più potenti di quello effettuato con le particelle alfa provenienti dalle sorgenti radioattive, che erano gli unici proiettili a disposizione di Rutherford e dei Joliot-Curie.

Il genere di esperimento effettuato dai Joliot-Curie all'inizio degli anni trenta sembrava a quel tempo destinato a rimanere confinato nella torre d'avorio della scienza, senza particolari applicazioni pratiche. I fatti dovevano dimostrare il contrario. Supponiamo di bombardare con neutroni un insieme di atomi di un solo tipo, o di più tipi: una certa percentuale di ogni tipo di atomi assorbirà un neutrone, producendo, in genere, un atomo radioattivo; questo decadrà, emettendo radiazione sotto forma di particelle o di raggi gamma.

Ogni tipo di atomo assorbirà i neutroni dando luogo a un tipo differente di atomo radioattivo, che emetterà radiazione diversa e caratteristica. Tale radiazione può essere rivelata con grande sensibilità e selettività: dalle caratteristiche della radiazione e dalla velocità con cui diminuisce la sua produzione, si può identificare l'atomo radioattivo che la emette, e da esso si può risalire all'atomo originario, qual era prima dell'assorbimento del neutrone. In tal modo è possibile analizzare le sostanze con una precisione senza precedenti ("analisi per attivazione da neutroni"): si possono rivelare quantità minime, dell'ordine di un trilionesimo di grammo, di un particolare nuclide.

L'analisi per attivazione da neutroni può essere usata per determinare piccolissime differenze nelle impurità contenute in campioni di particolari pigmenti che risalgono a secoli diversi; si può così stabilire, per esempio, l'autenticità di un quadro antico, usando solo un minuscolo frammento del suo colore. Altre applicazioni altrettanto raffinate sono possibili: sono stati esaminati perfino alcuni capelli del cadavere di Napoleone, sepolto da un secolo e mezzo, e si è trovato che contenevano piccole quantità di arsenico - benché sia difficile stabilire se esso provenisse da un medicinale, da un veleno, o vi si trovasse casualmente.

ACCELERATORI DI PARTICELLE.

Dirac aveva previsto non solo un antielettrone (il positrone), ma anche un antiprotone. Ma per produrre un antiprotone ci voleva molta più energia; infatti l'energia necessaria è proporzionale alla massa della particella in questione. Dato che la massa del protone è 1836 volte quella dell'elettrone, la formazione di un antiprotone richiedeva almeno 1836 volte l'energia necessaria per la formazione di un positrone. L'impresa dovette quindi attendere l'invenzione di un'apparecchiatura capace di accelerare le particelle subatomiche imprimendo loro energie sufficientemente alte.

Ai tempi della previsione di Dirac erano appena stati fatti i primi passi in questa direzione. Nel 1928, i fisici inglesi John Douglas Cockcroft e Ernest Thomas Sinton Walton, lavorando nel laboratorio di Rutherford, svilupparono un "moltiplicatore di tensione", uno strumento capace di creare elevati potenziali elettrici, e quindi di conferire al protone un'energia di quasi 400 mila elettronvolt. (Un "elettronvolt" è pari all'energia acquisita da un elettrone accelerato in un campo elettrico con una differenza di potenziale di 1 volt.) Con protoni accelerati in tale macchina, i due fisici riuscirono a spezzare il nucleo del litio, risultato per cui ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1951.

Nel frattempo il fisico americano Robert Jemison Van de Graaff stava realizzando un altro tipo di macchina acceleratrice, che opera essenzialmente una separazione degli elettroni dai protoni, depositandoli agli estremi opposti dell'apparecchio mediante un nastro trasportatore. Il "generatore elettrostatico di Van de Graaff" riusciva così a sviluppare una differenza di potenziale elettrico molto alta tra i due estremi opposti; Van de Graaff raggiunse gli 8 milioni di volt. I generatori elettrostatici oggi sono in grado di accelerare facilmente i protoni fino a una velocità corrispondente a 24 milioni di elettronvolt (i milioni di elettronvolt vengono indicati con l'abbreviazione "Mev").

Le immagini sensazionali delle enormi scintille prodotte nel generatore elettrostatico di Van de Graaff suscitarono nel grosso pubblico molto interesse e resero popolare questa macchina per «frantumare gli atomi», immaginata spesso come un congegno capace di produrre «fulmini artificiali»; naturalmente, era molto di più. (Un generatore destinato a produrre nient'altro che fulmini artificiali era stato effettivamente costruito nel 1922 dall'ingegnere elettrotecnico tedesco-americano Charles Proteus Steinmetz.)

L'energia che si può raggiungere con tale macchina trova un limite superiore nel fatto che le differenze di potenziale, in pratica, non possono essere aumentate indefinitamente. Ben presto, però, si trovò un altro sistema: si supponga di accelerare le particelle con una serie di piccole spinte, anziché con un unico, forte colpo.

Distanziando nel tempo in modo appropriato tali spinte, si può aumentare ogni volta la velocità, proprio come si può far salire sempre più in alto un bambino in altalena imprimendogli delle spinte «in fase» con le sue oscillazioni.

Nacque da quest'idea, nel 1931, l'"acceleratore lineare", in cui le particelle sono introdotte in un tubo suddiviso in sezioni: la forza acceleratrice è un campo elettrico alternato, predisposto in modo da impartire una nuova spinta alle particelle ogni volta che esse entrano in una successiva sezione. Ciascuna sezione deve pertanto essere più lunga della precedente perché le particelle, pur acquistando una velocità sempre maggiore, impieghino lo stesso tempo a percorrere ogni sezione, mantenendosi in fase con le spinte.

Non è facile ottenere l'indispensabile sincronizzazione; e comunque esiste un limite alla lunghezza che, in pratica, un tubo può avere; pertanto l'acceleratore lineare non ebbe grande successo negli anni trenta. Una delle ragioni che contribuirono a farlo passare in secondo piano fu il fatto che Ernest Orlando Lawrence dell'Università di California ebbe un'idea migliore.

Invece di obbligare le particelle a percorrere un tubo rettilineo, perché non farle girare lungo un percorso circolare, ricorrendo a un magnete per incurvarne la traiettoria? Ogni volta che avessero descritto una semicirconferenza, avrebbero ricevuto una spinta dal campo alternato; non sarebbe più stato così difficile, allora, controllare la sincronizzazione. Via via che le particelle avessero acquistato una maggior velocità, il magnete ne avrebbe incurvato meno il percorso, in modo da far loro descrivere circonferenze sempre più ampie, impiegando verosimilmente un tempo uguale per

ogni giro. Alla fine della loro corsa a spirale, le particelle sarebbero uscite dalla camera circolare (suddivisa, in realtà, in due metà semicircolari, a forma di «D»), colpendo il bersaglio.

La nuova apparecchiatura di Lawrence, più compatta delle precedenti, prese il nome di "ciclotrone". Il suo primo modello, del diametro di una trentina di centimetri, riusciva ad accelerare i protoni fino a circa 1,25 Mev. Nel 1939 l'Università di California disponeva di un ciclotrone con un magnete del diametro di un metro e mezzo, capace di accelerare le particelle fino a circa 20 Mev, cioè a una velocità doppia di quella delle particelle alfa più energetiche emesse dagli atomi radioattivi. In quello stesso anno Lawrence ricevette il premio Nobel per la fisica per la sua invenzione.

Il ciclotrone però dovette arrestarsi attorno ai 20 Mev, perché a tale energia le particelle viaggiavano così velocemente che l'aumento della massa con la velocità - effetto previsto dalla teoria della relatività di Einstein - diventava apprezzabile. Questo aumento della massa faceva ritardare le particelle, provocandone lo sfasamento rispetto agli impulsi elettrici. Era però possibile correre ai ripari, come fecero, indipendentemente, il fisico sovietico Vladimir Iosifovic' Veksler e il fisico californiano Edwin Mattison McMillan nel 1945.

Bastava sincronizzare il campo elettrico alternato con l'aumento di massa delle particelle: questa versione modificata del ciclotrone venne chiamata "sincrociclotrone"; nel 1946 l'Università di California ne aveva costruito uno che accelerava le particelle fino a un'energia compresa tra i 200 e i 400 Mev. In seguito sincrociclotroni ancora più grandi, negli Stati Uniti e in Unione Sovietica, elevarono le energie fino a 700-800 Mev.

Nel frattempo il problema dell'accelerazione degli elettroni era stato affrontato separatamente: per riuscire a frantumare gli atomi, i leggeri elettroni dovevano essere portati a velocità molto superiori a quelle dei protoni (proprio come una pallina da ping-pong, per fare altrettanti danni di una palla da golf, dovrebbe avere una velocità molto maggiore). Il ciclotrone non andava bene per gli elettroni perché, alle alte velocità necessarie per renderli efficaci, essi subivano un aumento troppo forte della massa. Nel 1940, il fisico americano Donald William Kerst ideò un sistema per accelerare gli elettroni che ne compensava l'aumento di massa con un aumento di intensità del campo elettrico: anziché descrivere una spirale verso l'esterno, gli elettroni descrivevano una traiettoria circolare costante. La nuova macchina venne chiamata "betatrone", dal nome delle particelle beta. Oggi i betatroni consentono di conferire agli elettroni energie che raggiungono i 340 Mev.

Un'altra macchina, basata su un'idea leggermente diversa, il "sincrotrone per elettroni" (o elettrosincrotrone) fu costruita per la prima volta in Inghilterra nel 1946 da F. K. Goward e D. E. Barnes.

Queste macchine consentono di ottenere energie fino ai 1000 Mev, ma non possono superare tale soglia perché gli elettroni, muovendosi su una traiettoria circolare, irraggiano sempre più energia al crescere della velocità. La radiazione prodotta da una particella accelerata viene chiamata "Bremsstrahlung", che in tedesco significa «radiazione di frenamento».

Ispirandosi tanto al betatrone quanto al sincrotrone per elettroni, i fisici che lavoravano con i protoni cominciarono, intorno al 1947, a costruire "sincrotroni per protoni", che mantenevano anch'essi le particelle su un'unica traiettoria circolare. Questa soluzione consentiva anche di ridurre le dimensioni dei magneti: infatti, quando le particelle descrivono un percorso a spirale diretto verso l'esterno, il magnete deve abbracciare tale spirale in tutta la sua ampiezza per mantenere uniforme ovunque l'intensità del campo magnetico; se, invece, la traiettoria descritta è una circonferenza, basta che il magnete ricopra una superficie più ristretta. Dato che il protone, avendo una massa maggiore, perde energia meno rapidamente dell'elettrone quando percorre una traiettoria circolare, i fisici si posero l'obiettivo di superare la soglia dei 1000 Mev con un protosincrotrone (sincrotrone per protoni). 1000 Mev sono pari a 1 miliardo di elettronvolt (abbreviazione Gev, dove G sta per «giga» e indica appunto un miliardo di volte. Negli Stati Uniti è usata anche l'abbreviazione Bev = billion electron volts).

Nel 1952, il Laboratorio Nazionale di Brookhaven a Long Island terminò la costruzione di un sincrotrone per protoni che raggiungeva i 2-3 Gev, e che venne chiamato "cosmotrone", perché l'energia raggiunta dalle particelle era dell'ordine di grandezza di quella dei raggi cosmici. Due anni dopo, l'Università di California inaugurò il suo "bevatrone", capace di produrre particelle con energia tra i 5 e i 6 Bev. Poi, nel 1957, l'Unione Sovietica annunciò che il suo "fasotrone" aveva raggiunto i 10 Gev.

Ma oggi queste macchine sembrano dei gingilli in confronto agli acceleratori di un tipo nuovo, chiamati "sincrotroni a focalizzazione forte". Negli acceleratori tipo bevatrone il limite veniva dal fatto che le particelle del fascio si allargavano, perdendosi contro le pareti del tubo. Nel nuovo tipo questo inconveniente è ovviato mediante campi magnetici alternati di varia forma, che focalizzano le particelle entro un fascio ristretto. Questa era un'idea già venuta a Christofilos che, anche in questo caso, superò con il suo acume da dilettante i professionisti, come era successo nel caso dell'effetto che da lui prese il nome. Tra parentesi, questa soluzione permette anche di diminuire ulteriormente le dimensioni del magnete necessario per raggiungere un determinato livello di energia. L'aumento di cinquanta volte dell'energia delle particelle fu ottenuto con un magnete di massa neppure doppia.

Nel novembre 1959, il CERN, Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare, un'organizzazione nella quale collaborano dodici nazioni, mise in funzione a Ginevra un sincrotrone a focalizzazione forte che raggiungeva i 24 Gev e produceva grandi ondate di particelle (contenenti 10 miliardi di protoni) ogni 3 secondi. Questo sincrotrone ha un diametro lungo come tre isolati: il percorso circolare al suo interno è di circa 650 metri. Nell'intervallo di 3 secondi durante il quale si forma l'ondata, i protoni percorrono questa traiettoria circolare mezzo milione di volte. Il magnete pesa 3500 tonnellate ed è costato 30 milioni di dollari.

Ma i progressi non ebbero sosta. Si cercò di raggiungere energie sempre maggiori allo scopo di produrre interazioni sempre più insolite, che dessero origine a particelle di massa sempre maggiore, per conoscere sempre più cose sulla struttura ultima della materia.

Per esempio, anziché accelerare un fascio di particelle e farle collidere con un bersaglio fisso, si pensò di produrre due fasci, facendoli circolare in direzioni opposte entro "anelli di accumulazione", in cui la velocità viene facilmente mantenuta per un certo periodo di tempo. In istanti appropriati i due fasci vengono orientati in modo da farli collidere frontalmente. L'energia efficace della collisione è quadrupla di quella che si ha nella collisione con un bersaglio fisso. Al Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) vicino a Chicago, è entrato in funzione nel 1982 un acceleratore che opera in base a questo principio e dovrebbe essere in grado di raggiungere i 1000 Gev; viene chiamato "tevatrone" (t è qui ovviamente l'iniziale di trilione). Altri acceleratori sono in corso di progettazione, e si spera di raggiungere i 20 000 Gev.

Anche l'"acceleratore lineare", o "linac", è ritornato in auge.

Progressi tecnologici hanno permesso di superare le difficoltà che affliggevano i primi modelli: per energie estremamente elevate un acceleratore lineare presenta alcuni vantaggi rispetto a quelli circolari. Dato che gli elettroni non emettono energia quando viaggiano in linea retta, un linac può accelerare più efficacemente gli elettroni e mettere a fuoco i fasci sui bersagli con maggior precisione. L'Università di Stanford ha costruito un acceleratore lineare lungo più di 3 chilometri, che può raggiungere anche energie di 45 Gev.

Solo con il bevatrone gli uomini sono riusciti a rendere possibile la creazione dell'antiprotone. I fisici californiani si diedero come obiettivo quello di produrlo e di rilevarne la presenza. Nel 1955, Owen Chamberlain ed Emilio Segrè, dopo aver bombardato per ore un bersaglio di rame con protoni da 6,2 Gev, riuscirono finalmente a catturare l'antiprotone - anzi, a catturarne una sessantina. La loro identificazione fu tutt'altro che facile. Per ogni antiprotone prodotto nascevano 40 mila particelle di altro tipo. Tuttavia i due fisici riuscirono a riconoscere al di là di ogni dubbio la particella di cui andavano in cerca, mediante un elaborato sistema di

rivelatori progettati e sistemati in modo tale che solo un antiprotone potesse interagire con tutti. Per la loro impresa Chamberlain e Segrè ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1959.

L'antiprotone è altrettanto evanescente quanto il positrone - almeno nel nostro universo; nel giro di una frazione infinitesima di secondo dopo la sua creazione, la particella viene catturata da un normale nucleo, carico positivamente: l'antiprotone e uno dei protoni del nucleo si annichilano a vicenda, trasformandosi in energia e in altre particelle più piccole. Nel 1965 si riuscì a concentrare energia sufficiente per realizzare il processo inverso e produrre una coppia protone-antiprotone.

Può anche capitare, molto raramente, che un protone e un antiprotone abbiano solo una quasi-collisione, in cui neutralizzano mutuamente le rispettive cariche. Il protone si trasforma in un neutrone, e fin qui tutto bene; ma l'antiprotone diventa un "antineutrone"! Cosa può essere un antineutrone? Il positrone è l'opposto dell'elettrone in virtù della sua carica opposta; analogamente, l'antiprotone è un'antiparticella in virtù della sua carica. Ma nel caso dell'antineutrone, che è privo di carica, in cosa consiste la qualità di antiparticella?

LO SPIN DELLE PARTICELLE.

Questo ci obbliga a tornare sulla questione dello spin, che fu introdotto per la prima volta, nel 1925, dai fisici olandesi George Eugene Uhlenbeck e Samuel Abraham Goudsmit. Ruotando su se stesse, le particelle generano piccolissimi campi magnetici; tali campi sono stati misurati e studiati a fondo, soprattutto dal fisico tedesco Otto Stern e dal fisico americano Isidor Isaac Rabi, che ricevettero il premio Nobel, rispettivamente nel 1943 e nel 1944, per le loro ricerche su questo fenomeno.

Le particelle - come il protone, il neutrone e l'elettrone - che hanno uno spin espresso da un numero semintero, obbediscono a un sistema di regole che furono enunciate indipendentemente, nel 1926, da Fermi e da Dirac, e che pertanto vanno sotto il nome di "statistica di Fermi-Dirac". Tali particelle sono dette "fermioni": quindi, protone, elettrone e neutrone sono tutti fermioni.

Ma esistono anche particelle il cui spin è espresso da un numero intero; queste vanno descritte in base a un altro insieme di regole, elaborate da Einstein e dal fisico indiano Satyendranath Bose. Le particelle che seguono la cosiddetta "statistica di Bose-Einstein" vengono chiamate "bosoni"; la particella alfa, per esempio, è un bosone.

Queste due classi di particelle hanno proprietà diverse; per esempio, il principio di esclusione di Pauli (vedi capitolo quinto) vale non solo per gli elettroni, ma anche per tutti i fermioni. Esso, invece, non vale per i bosoni.

È facile capire come faccia una particella carica a dare origine a un campo magnetico, ma non altrettanto si può dire nel caso del neutrone, che non ha carica. Eppure ciò accade al di là di ogni dubbio. La prova più immediata è la seguente: quando un fascio di neutroni colpisce del ferro magnetizzato, esso si comporta in modo ben diverso che nel caso di ferro non magnetizzato. Le proprietà magnetiche del neutrone si spiegano con il fatto (su cui torneremo in seguito) che esso è molto probabilmente costituito da altre particelle, dotate di carica elettrica; le cariche di tali particelle si controbilancerebbero l'un l'altra nel neutrone, riuscendo purtuttavia a dare origine a un campo magnetico allorché la particella è in rotazione.

Comunque stiano le cose, lo spin del neutrone ci fornisce la risposta che cercavamo a proposito dell'antineutrone: quest'ultimo altro non è che un neutrone con lo spin rovesciato, cioè con il polo magnetico sud situato, per esempio, in alto anziché in basso. Spin antiparalleli caratterizzano effettivamente anche la coppia protone-antiprotone e quella elettrone-positrone.

Le antiparticelle possono indubbiamente combinarsi, dando origine all'"antimateria", proprio come le particelle normali danno origine alla materia. Il primo esempio concreto di antimateria fu prodotto a Brookhaven nel 1965: bombardando un bersaglio di berillio con protoni di energia pari a 7 Gev, si ottennero combinazioni di un antiprotone e di un antineutrone, cioè degli "antideutoni". In seguito venne prodotto l'"antielio 3"; senza dubbio sarebbe possibile ottenere, volendo, antinuclei

ancora più complessi. Comunque il principio è chiaro e nessun fisico lo mette in dubbio: l'antimateria può esistere.

Ma esiste, nella realtà? Esistono masse di antimateria nell'universo?

Se esistessero, non rivelerebbero la propria presenza a grande distanza: gli effetti gravitazionali e luminosi da esse prodotti sarebbero esattamente uguali a quelli prodotti dalla materia ordinaria; tuttavia, se grandi quantità di antimateria si incontrassero con la materia ordinaria, ne risulterebbero reazioni di annichilazione di massa che si farebbero - e come! - notare. Si tratta di una possibilità, finora però non verificata. Gli astronomi non sono riusciti a scoprire in alcuna parte del cielo vampate di energia attribuibili con certezza a una annichilazione materia-antimateria. Si può allora affermare che l'universo è costituito esclusivamente di materia, senza affatto antimateria, o con pochissima antimateria? E se così fosse, quale ne sarebbe la ragione? Dato che materia e antimateria si equivalgono sotto ogni aspetto, salvo quello di avere proprietà opposte dal punto di vista elettromagnetico, qualsiasi forza tale da creare l'una dovrebbe creare anche l'altra, e l'universo dovrebbe essere fatto di uguali quantità dell'una e dell'altra.

È un bel dilemma: la teoria ci dice che dovrebbe esserci dell'antimateria nello spazio, e l'osservazione rifiuta di confermarlo. Siamo poi sicuri che manchino le osservazioni? Cosa sappiamo veramente dei nuclei attivi delle galassie e, peggio ancora, delle quasar? Non potrebbe darsi che questi fenomeni ad alte energie siano dovuti all'annichilazione materia-antimateria? Probabilmente no!

Anche tale annichilazione non appare sufficiente a spiegarli, tanto che gli astronomi preferiscono ammettere l'esistenza di collassi gravitazionali e buchi neri, che sono gli unici meccanismi noti capaci di produrre l'energia necessaria.

I RAGGI COSMICI.

Che dire, poi, dei raggi cosmici? Gran parte delle particelle dei raggi cosmici hanno energie comprese tra 1 e 10 Gev, che potrebbero essere spiegate con l'interazione materia-antimateria; ma alcune raggiungono energie molto più elevate, di 20 Bev, 30 Bev o 40 Bev. I fisici del MIT (Istituto di Tecnologia del Massachussets) ne hanno addirittura trovate alcune con la colossale energia di 20 miliardi di Gev. Numeri siffatti superano le possibilità di intuizione della nostra mente, ma possiamo tuttavia farcene un'idea calcolando che la quantità di energia rappresentata da 20 miliardi di Gev basterebbe a una singola particella submicroscopica per sollevare di 5 centimetri un peso di quasi 2 chilogrammi.

Da quando sono stati scoperti i raggi cosmici, ci si è sempre chiesto da dove vengano e cosa dia loro origine. La risposta più semplice è che in qualche luogo imprecisato della galassia - forse nel nostro sole, forse molto più lontano - avvengano delle reazioni nucleari che «sparano» particelle dotate delle altissime energie che noi rileviamo.

In effetti, ondate di raggi cosmici «molli» (cioè con energia relativamente bassa) si manifestano circa ogni due anni (come si è scoperto nel 1942), in corrispondenza dei brillamenti solari. Cosa potrebbero fare, allora, sorgenti come le supernovae, le pulsar, le quasar? Ma non esiste reazione nucleare nota capace di produrre qualcosa di simile a 20 miliardi di Gev. La mutua annichilazione dei nuclei più pesanti di materia e antimateria libererebbe particelle veloci con energie di 250 Gev al massimo.

Una spiegazione alternativa consiste nel supporre, come fece Fermi, che nello spazio qualche forza acceleri le particelle cosmiche; queste potrebbero essere prodotte con energie inizialmente moderate da esplosioni come quelle delle supernovae, ed essere accelerate poi gradualmente mentre attraversano lo spazio. Oggi, la teoria più ampiamente accettata è quella secondo cui le particelle verrebbero accelerate da campi magnetici cosmici, che agirebbero come giganteschi sincrotroni. Campi magnetici esistono effettivamente nello spazio, e si ritiene che la

nostra galassia nel suo insieme ne possieda uno, anche se la sua intensità potrebbe essere al massimo 1 su 20 mila di quella del campo magnetico associato alla terra.

Viaggiando in questo campo, le particelle cosmiche subirebbero una lenta accelerazione lungo una traiettoria curva; acquistando energia, le loro traiettorie si allargherebbero sempre più e a un certo punto le particelle più energetiche riuscirebbero a sfuggire all'esterno della galassia. La maggior parte delle particelle non riuscirebbero mai a raggiungere una di queste traiettorie di fuga, perché perderebbero parte della loro energia nelle collisioni con altre particelle o con corpi di grosse dimensioni; alcune, tuttavia, vi riuscirebbero. In effetti potrebbe darsi che le particelle cosmiche più energetiche che ci raggiungono attraversino la nostra galassia dopo esser state scagliate fuori da altre galassie in questo modo.

LA STRUTTURA DEL NUCLEO.

Ora che sappiamo tante cose sulla costituzione generale e sulla natura del nucleo, vorremmo saperne molte di più sulla sua struttura e soprattutto sui particolari del suo interno. Per prima cosa, che forma ha? Dato che è tanto piccolo e che neutroni e protoni vi si addensano così compatti, naturalmente i fisici l'hanno ritenuto sferico.

Studiando nei particolari gli spettri atomici, si è indotti a pensare che molti nuclei abbiano effettivamente una distribuzione di carica sferica; altri si comportano invece come se contenessero due coppie di poli magnetici; pertanto si usa dire che tali nuclei hanno un "momento di quadrupolo". La loro deviazione dalla forma sferica non è, tuttavia, grande: il caso più estremo è quello dei nuclei dei lantanidi, in cui la distribuzione delle cariche assume la forma di un ellissoide allungato (simile a quella di un pallone da rugby). Anche in questo caso l'asse maggiore non supera per più del 20 per cento l'asse minore.

Quanto alla struttura interna del nucleo, il modello più semplice lo rappresenta come un aggregato di particelle molto pigiate, alquanto simile a una goccia di liquido, in cui le particelle (molecole) sono vicinissime tra loro, in cui la densità è pressoché uniforme e vi è una superficie di separazione ben marcata.

Questo "modello a goccia liquida" fu elaborato dettagliatamente nel 1936 da Niels Bohr; esso offre una possibile spiegazione dell'assorbimento e dell'emissione di particelle da parte di alcuni nuclei; si potrebbe supporre che, al momento in cui una particella entra in un nucleo, essa distribuisca la propria energia cinetica tra tutte le particelle molto ammassate, cosicché nessuna di esse riceve abbastanza energia per poter uscire immediatamente dal nucleo; dopo circa un quadrilionesimo di secondo, quando c'è stato il tempo per miliardi di collisioni casuali, alcune particelle accumulano sufficiente energia per sfuggire dal nucleo.

Il modello riesce anche a spiegare l'emissione di particelle alfa da parte dei nuclei pesanti. Questi grossi nuclei possono vibrare, proprio come fa una goccia di liquido, se le particelle che li costituiscono si muovono qua e là, scambiandosi energia. Tutti i nuclei vibrano in questo modo, ma quelli più grossi sono meno stabili e hanno maggior probabilità di spezzarsi. Per tale ragione porzioni di nucleo, sotto forma di particelle alfa, costituite da due protoni e due neutroni (una combinazione molto stabile), possono staccarsi spontaneamente dalla superficie del nucleo: di conseguenza questo diventa più piccolo e meno esposto a rotture dovute alla vibrazione, e raggiunge la stabilità.

La vibrazione può tuttavia portare a un'altra forma di instabilità.

Quando una grossa goccia di liquido sospesa in un altro liquido viene posta in oscillazione dalle correnti esistenti nel liquido circostante, essa tende a spezzarsi in due gocce più piccole, spesso approssimativamente uguali. Si è poi scoperto, nel 1939 (ne riparleremo nel capitolo decimo), che si possono davvero spezzare certi grossi nuclei in questo modo, bombardandoli con neutroni: è questa la "fissione nucleare".

Le fissioni nucleari dovrebbero in realtà verificarsi talvolta anche senza l'intervento di una particella proveniente dall'esterno che turbi l'equilibrio del nucleo. La vibrazione interna dovrebbe causare una volta ogni tanto la spaccatura del nucleo in due parti. Nel 1940, i fisici sovietici G. N. Flerov e K. A. Petrjak osservarono effettivamente questa "fissione spontanea" in nuclei di uranio.

L'instabilità dell'uranio si manifesta soprattutto attraverso l'emissione di particelle alfa, ma in un chilogrammo di uranio avvengono 8 fissioni spontanee al secondo, mentre circa 16 milioni di nuclei (sempre ogni secondo) emettono particelle alfa.

La fissione spontanea avviene anche nel protoattinio, nel torio e, più frequentemente, negli elementi transuranici. Al crescere delle dimensioni dei nuclei, la probabilità di fissione spontanea aumenta.

Negli elementi più pesanti di tutti questo diventa il più importante processo di decadimento, assai più frequente dell'emissione di particelle alfa.

Un altro modello molto usato del nucleo stabilisce un parallelo tra esso e l'intero atomo: in tale analogia, i nucleoni contenuti nel nucleo sono paragonati agli elettroni orbitali; anche i nucleoni occuperebbero strati e sottostrati, che si influenzerebbero tra loro solo debolmente. Questo viene chiamato "modello a strati".

Per analogia con gli strati elettronici dell'atomo, si potrebbe supporre che i nuclei con strati nucleonici esterni saturi fossero più stabili di quelli con strati esterni non saturi. Secondo la teoria più semplice, sarebbero particolarmente stabili i nuclei con 2, 8, 20, 40, 70 o 112 protoni o neutroni. Tale supposizione, comunque, non è suffragata dall'osservazione. Il fisico tedesco-americano Maria Goeppert Mayer prese in considerazione lo spin di protoni e neutroni, mostrando come questo influisse sulla situazione. Risultò che i nuclei contenenti 2, 8, 20, 50, 82 o 126 protoni o neutroni sarebbero dovuti essere particolarmente stabili - il che concorda con l'osservazione. I nuclei con 28 o 40 protoni o neutroni sarebbero abbastanza stabili; tutti gli altri, invece, sarebbero meno stabili o addirittura instabili. Questi numeri vengono talvolta chiamati "numeri magici" (e "semimagici" vengono talora detti i numeri 28 e 40).

Tra i nuclei aventi numeri magici vi sono l'elio 4 (2 protoni e 2 neutroni), l'ossigeno 16 (8 protoni e 8 neutroni) e il calcio 40 (20 protoni e 20 neutroni), tutti particolarmente stabili e più abbondanti nell'universo di altri nuclei di grandezza simile.

Quanto ai numeri magici più alti, lo stagno ha dieci isotopi stabili, ognuno con 50 protoni, il piombo ne ha quattro, ciascuno con 82 protoni. Vi sono cinque isotopi stabili (di elementi differenti) con 50 neutroni, e sette isotopi stabili con 82 neutroni ciascuno. In generale, le previsioni particolareggiate della teoria del nucleo a strati funzionano meglio in vicinanza dei numeri magici. A metà strada tra l'uno e l'altro (per esempio per i lantanidi e gli attinidi), le cose vanno maluccio. Tuttavia, proprio in tali regioni a metà strada, i nuclei si allontanano maggiormente dalla forma sferica, essendo più decisamente ellissoidali (e la teoria del nucleo a strati presuppone proprio la forma sferica). Il premio Nobel per la fisica del 1963 venne assegnato a Goeppert Mayer e agli altri due fisici, Eugene Wigner e il tedesco Johannes Hans Daniel Jensen, che avevano contribuito a elaborare questa teoria.

In generale, man mano che aumenta la complessità dei nuclei aumenta anche la loro rarità nell'universo, o la loro instabilità, o entrambe.

Gli isotopi stabili più complessi sono il piombo 208 e il bismuto 209, ciascuno con il numero magico di 126 neutroni, e il piombo con in più il numero magico di 82 protoni. Di qui in avanti tutti i nuclidi sono instabili e, in genere, lo diventano sempre di più al crescere delle dimensioni del nucleo. I numeri magici, però, spiegano il fatto che il torio e l'uranio posseggano degli isotopi molto più prossimi alla stabilità rispetto ad altri nuclidi di dimensioni analoghe. La teoria prevede anche che alcuni isotopi degli elementi 110 e 114 possano essere (come si è già accennato) considerevolmente meno instabili di altri nuclidi di pari dimensioni. Per questi ultimi, dobbiamo aspettare per saperne di più.

I LEPTONI.

L'elettrone e il positrone sono degni di nota per la piccolezza della loro massa - solo 1 su 1836 di quella del protone, del neutrone, dell'antiprotone o dell'antineutrone - quindi vengono indicati con l'unico termine di "leptoni" (dal greco «leptòs», che significa «leggero»).

Anche se è passato quasi un secolo dalla scoperta dell'elettrone, non si è ancora trovata una particella che abbia una massa minore della sua (o di quella del positrone) e che tuttavia sia dotata di una carica elettrica; anzi, neppure ci si aspetta di trovarla. Potrebbe darsi che la carica elettrica, qualsiasi cosa essa sia (sappiamo, infatti, come essa si comporti e come misurare le sue proprietà, ma non sappiamo cosa "sia"), risulti associata a una massa minima e che si tratti proprio di quella dell'elettrone. Anzi, potrebbe darsi che nell'elettrone non vi sia "altro che" la carica; quando l'elettrone si comporta come una particella, la carica elettrica di tale particella risulta priva di estensione, puramente puntiforme.

Certo, esistono particelle a cui non è associata alcuna massa (o, per essere più precisi, alcuna "massa di riposo", come spiegherò nel prossimo capitolo); ma esse non hanno neppure carica elettrica. Per esempio, le onde luminose e le altre forme di radiazione elettromagnetica possono comportarsi come particelle (vedi ancora il prossimo capitolo). L'aspetto corpuscolare di qualcosa che solitamente concepiamo come onda viene chiamato "fotone" (dal termine greco che indica la luce).

Il fotone ha massa zero, carica elettrica zero, ma spin 1; è quindi un bosone. Come facciamo a definire il suo spin? I fotoni partecipano alle reazioni nucleari: in alcuni casi vengono assorbiti, in altri emessi; in tali reazioni nucleari, lo spin totale delle particelle interessate deve restare immutato prima della reazione e dopo ("conservazione dello spin"); l'unico modo perché questo avvenga nelle reazioni nucleari a cui partecipano i fotoni è che essi abbiano spin pari a 1. Il fotone non viene considerato un leptone, perché questo termine è riservato ai soli fermioni.

Esistono ragioni teoriche che fanno pensare che, quando una massa viene accelerata (per esempio quando si muove in un'orbita ellittica intorno a un'altra massa o quando subisce un collasso gravitazionale), ceda energia sotto forma di onde gravitazionali; queste dovrebbero possedere anch'esse un aspetto corpuscolare; una siffatta particella gravitazionale viene chiamata "gravitone".

La forza gravitazionale è molto, molto più debole di quella elettromagnetica. Un protone e un elettrone esercitano una mutua attrazione gravitazionale che è solo 1 su 10 alla trentanovesima della loro attrazione elettromagnetica. Lo stesso rapporto deve sussistere tra l'energia del gravitone e quella del fotone; rivelare la presenza del gravitone è quindi compito incredibilmente difficile.

Nonostante ciò, il fisico americano Joseph Weber nel 1957 si accinse al compito formidabile di tentare di osservare il gravitone. Dopo vari tentativi, egli ricorse a due cilindri di alluminio, lunghi 153 centimetri e larghi 66, sospesi a un filo metallico in una camera in cui era stato fatto il vuoto. I gravitoni (che sarebbero stati rivelati nella loro forma ondulatoria) avrebbero dovuto provocare un leggero spostamento dei cilindri: era stato apprestato un sistema capace di rivelare uno spostamento di un centesimo di trilionesimo di centimetro. Le deboli onde associate ai gravitoni, provenienti dalle profondità dello spazio, avrebbero dovuto investire l'intero pianeta, e cilindri separati da grandi distanze avrebbero dovuto risentirne simultaneamente. Nel 1969 Weber annunciò di aver registrato gli effetti delle onde gravitazionali. Il suo annuncio suscitò enorme interesse, perché costituiva una conferma di una teoria particolarmente importante, quella einsteiniana della relatività generale. Purtroppo non tutte le storie nella scienza sono a lieto fine. Altri scienziati non riuscirono a riottenere i risultati di Weber, nonostante i molti sforzi; l'impressione diffusa nella comunità scientifica è che i gravitoni non siano ancora stati osservati; tuttavia, i fisici confidano abbastanza nella teoria per esser sicuri che i gravitoni esistono davvero: sono particelle di massa zero, carica zero e spin 2; inoltre sono bosoni e neppure loro fanno parte dei leptoni.

Fotoni e gravitoni non possiedono antiparticelle; o, per meglio dire, coincidono con la propria antiparticella. Per capire cosa intendiamo dire, si immagini di piegare un foglio per il lungo e poi di riaprirlo; ora vi è un solco lungo la sua mediana: tracciando un cerchietto alla sinistra della piega e un altro cerchietto alla sua destra, alla stessa distanza, possiamo rappresentare un elettrone e un positrone; fotone e gravitone si troverebbero esattamente sulla piega.

NEUTRINI E ANTINEUTRINI.

Fino a qui sembrerebbe che vi siano due leptoni: l'elettrone e il positrone. Sarebbe piaciuto molto ai fisici che così stessero le cose: non sembrava che vi fosse alcun particolare bisogno di altri leptoni - eppure tale bisogno esisteva. La questione nacque da alcune difficoltà a proposito dell'emissione di particelle beta da parte dei nuclei radioattivi.

La particella emessa da un nucleo radioattivo in genere trasporta una considerevole quantità di energia. Da dove viene tutta questa energia?

Essa è il risultato della conversione di una piccola frazione della massa del nucleo; in altri termini, il nucleo perde sempre una piccola percentuale della propria massa quando espelle una particella. Orbene, i fisici da tempo si chiedevano come mai l'energia di una particella beta emessa nel corso del decadimento radioattivo spesso non fosse sufficiente a spiegare la perdita di massa nel nucleo. In realtà, il deficit non era uguale per tutti gli elettroni: essi presentavano un ampio spettro di energie, la massima delle quali (raggiunta da pochissimi elettroni) era quasi sufficiente a spiegare la perdita di massa, mentre tutte le altre erano troppo scarse, in minore o maggiore misura. Questa non era una caratteristica necessaria di tutti i processi di emissione delle particelle subatomiche: le particelle alfa emesse da un dato nuclide avevano tutte ugual energia, nella quantità prevista. Cosa non andava, dunque, nell'emissione delle particelle beta? Cosa era avvenuto dell'energia mancante?

Lise Meitner, nel 1922, fu la prima a porre questa domanda con conveniente vigore; e attorno al 1930 Niels Bohr era, per parte sua, disposto ad abbandonare il fondamentale principio di conservazione dell'energia, perlomeno per quanto riguardava la sua applicazione alle particelle subatomiche. Ma nel 1931 Wolfgang Pauli, in un tentativo di salvare la conservazione dell'energia (vedi capitolo ottavo), propose una soluzione all'enigma dell'energia mancante; era una soluzione molto semplice: dal nucleo doveva uscire, insieme alla particella beta, un'altra particella fornita dell'energia mancante; questa seconda e misteriosa particella doveva avere delle proprietà piuttosto strane: non avrebbe avuto né carica né massa: dotata solo di una certa quantità di energia, si sarebbe spostata con la velocità della luce.

Questa particella appariva in realtà come una creazione artificiosa, inventata per far quadrare il bilancio energetico.

Eppure, non appena fu proposta l'idea di una siffatta particella, i fisici furono sicuri della sua esistenza. Quando poi fu scoperto il neutrone e si vide che decadeva dando origine a un protone e a un elettrone, anch'esso con un deficit di energia analogo a quello riscontrato nel decadimento beta, la sicurezza dei fisici aumentò. Enrico Fermi, in Italia, diede alla ipotetica particella un nome: "neutrino".

Il neutrone offrì ai fisici un'altra prova a favore dell'esistenza del neutrino. Quasi tutte le particelle, infatti, hanno uno spin, come già ho detto. A seconda della sua direzione, esso è espresso da multipli positivi o negativi di 1 su 2: orbene, il protone, il neutrone e l'elettrone hanno tutti spin 1 su 2; ma se il neutrone, con spin 1 su 2, dà origine a un protone e a un elettrone, che ne è della legge di conservazione dello spin? I conti non tornano. La somma degli spin del protone e dell'elettrone può essere pari a 1 (quando le due particelle hanno spin nella stessa direzione) o a zero (se la direzione degli spin è opposta); ma mai potrà essere pari a 1 su 2, comunque voi giriate la cosa. Di nuovo è il neutrino a salvare la situazione.

Supponiamo che lo spin del neutrone sia + 1 su 2. Supponiamo inoltre che lo spin del protone sia + 1 su 2 e quello dell'elettrone meno 1 su 2, con un totale pari a zero. Ora, basta dare al

neutrino lo spin + 1 su 2, in modo che anch'esso sia un fermione (e quindi un leptone) - ed ecco che i conti tornano perfettamente:

+ 1 su 2(n) = + 1 su 2(p) meno 1 su 2(e) + 1 su 2 (neutrino).

C'è ancora qualcosa da sistemare. Una sola particella (il neutrone) ha dato origine a due particelle (il protone e l'elettrone); anzi, se teniamo conto anche del neutrino, ne ha prodotte tre. Appare più ragionevole supporre che il neutrone si sia convertito in due particelle e un'antiparticella, cioè, al netto, in una sola particella. In altri termini, ciò di cui veramente abbiamo bisogno per far tornare i conti non è un neutrino, ma un antineutrino.

Il neutrino, a sua volta, risulterebbe dalla conversione di un protone in un neutrone. I prodotti del decadimento sarebbero allora un neutrone (particella), un positrone (antiparticella) e un neutrino (particella). Anche in questo caso i conti tornano.

In altri termini, l'esistenza di neutrini e antineutrini salverebbe non una soltanto, ma tre importanti leggi di conservazione: la conservazione dell'energia, la conservazione dello spin e la conservazione della differenza tra numero delle particelle e numero delle antiparticelle. È importante salvare queste leggi, perché esse sembrano essere valide in tutte le reazioni nucleari in cui non compaiono elettroni e positroni, e sarebbe auspicabile che lo fossero anche nelle reazioni in cui tali particelle compaiono.

Le conversioni protone-neutrone più importanti sono quelle che hanno luogo nelle reazioni nucleari che avvengono nel sole e nelle altre stelle. Pertanto le stelle emettono flussi costanti di neutrini, ed è in tal modo che cedono, si stima, dal 6 all'8 per cento della loro energia. Ciò vale però solo per stelle come il nostro sole. Nel 1961, il fisico americano Hong Yee Chiu avanzò l'ipotesi che, allorché la temperatura centrale di una stella sale, diventino importanti anche altre reazioni in cui vengono prodotti neutrini. Quando cioè il nucleo della stella, progredendo nella sua evoluzione, raggiunge temperature più elevate (vedi capitolo secondo), una frazione ancora maggiore della sua energia viene emessa sotto forma di neutrini.

Questa concezione contiene qualcosa di estremamente importante. Il sistema con cui viene comunemente trasmessa l'energia, cioè per mezzo dei fotoni, è lento. I fotoni interagiscono con la materia, e dal centro del sole riescono a raggiungere la sua superficie solo dopo innumerevoli miriadi di assorbimenti e di riemissioni; è per questo che la temperatura superficiale del sole è di soli 6000 gradi C, mentre quella del suo centro raggiunge i 15 milioni di gradi. Si può insomma dire che la materia che forma il sole è un buon isolante termico.

I neutrini, invece, in pratica non interagiscono con la materia. Si è calcolato che un neutrino potrebbe attraversare in media 100 anni luce di piombo massiccio con solo il 50 per cento di probabilità di venire assorbito. Pertanto tutti i neutrini che si formano nel nucleo del sole si dirigono subito, alla velocità della luce, verso la superficie, raggiungendola senza interferenze e in meno di tre secondi, per poi proseguire nello spazio. (I neutrini diretti verso di noi attraversano il nostro corpo senza produrre alcun effetto e senza che ce ne accorgiamo, di giorno come di notte; infatti, anche se di notte la massa della terra è interposta tra noi e il sole, i neutrini l'attraversano senza difficoltà.)

Chiu ha calcolato che, quando al centro di una stella la temperatura ha raggiunto i 6 miliardi di gradi K, la maggior parte dell'energia della stella viene pompata via dai neutrini; essi si allontanano immediatamente dal centro, portandosi via tutta quanta l'energia, e il nucleo della stella si raffredda drasticamente. È questo, forse, che provoca la catastrofica contrazione che si manifesta sotto forma di supernova.

LA CACCIA AL NEUTRINO.

Si producono antineutrini in tutte le conversioni neutrone-protone; queste, però, non si verificano, per quanto se ne sa, su scala così vasta come le reazioni che generano i flussi di neutrini che provengono da qualsiasi stella. Le sorgenti più importanti di antineutrini sono la radioattività naturale e la fissione dell'uranio (di cui parlerò più in dettaglio nel capitolo decimo).

I fisici, naturalmente, non poterono mettersi il cuore in pace finché non ebbero scovato il neutrino; gli scienziati non amano accettare i fenomeni, o le leggi di natura, solo in virtù di un atto di fede. Ma come rivelare un'entità così sfuggente come il neutrino - un oggetto senza massa, senza carica, praticamente senza alcuna propensione a interagire con la materia ordinaria?

C'era, però, una tenue speranza: la probabilità che un neutrino interagisca con una particella qualsiasi è bassissima, ma non del tutto nulla. Quando si dice che i neutrini possono attraversare senza interagire 100 anni luce di piombo, si parla solo della media; un singolo neutrino, però, può reagire con qualche particella prima di arrivare così lontano, e ve ne sarà un certo numero - una frazione inconcepibilmente piccola del numero totale - che sarà fermata anche da pochi millimetri di piombo.

Nel 1953, un gruppo di fisici, diretto da Clyde Lorrain Cowan e Frederick Reines del Laboratorio Scientifico di Los Alamos, decise di tentare l'impossibile. Essi installarono la loro apparecchiatura rivelatrice di neutrini vicino a un reattore nucleare della Commissione per l'energia atomica sul fiume Savannah, in Georgia. Il reattore avrebbe fornito fasci di neutroni che a loro volta - si sperava - avrebbero rilasciato grandi quantità di antineutrini; per catturarli, i ricercatori intendevano usare grandi vasche di acqua. Il piano consisteva nel far sì che gli antineutrini bombardassero i protoni (nuclei di idrogeno) dell'acqua, nella speranza di osservare gli effetti della cattura di un antineutrino da parte di un protone.

Cosa poteva succedere? Quando un neutrone si disintegra, dà origine a un protone, un elettrone e un antineutrino; ora, l'assorbimento di un antineutrino da parte di un protone doveva produrre sostanzialmente l'inverso, cioè il protone doveva convertirsi in un neutrone, emettendo nel contempo un positrone. Vi erano quindi due cose di cui andare in cerca: 1) la creazione di neutroni; 2) la creazione di positroni. I neutroni potevano essere rivelati sciogliendo nell'acqua un composto di cadmio; infatti, quando il cadmio assorbe neutroni, emette raggi gamma di un'energia caratteristica. Quanto ai positroni, potevano essere identificati attraverso la loro interazione di annichilazione con gli elettroni, che avrebbe prodotto altri ben definiti raggi gamma. Se gli strumenti avessero rivelato raggi gamma esattamente delle due energie previste, separati da intervalli di tempo appropriati, gli sperimentatori avrebbero potuto essere certi di aver catturato degli antineutrini.

Gli ingegnosi strumenti di rivelazione furono approntati e si attese pazientemente; nel 1956, esattamente un quarto di secolo dopo che Pauli aveva ipotizzato l'esistenza della particella, l'antineutrino cadde finalmente in trappola. I giornali (e perfino qualche rivista di alto livello) lo chiamarono semplicemente "neutrino".

Per arrivare al vero neutrino, occorreva una sorgente che ne fosse ricca. Quella più ovvia era il sole. Che sistema si poteva usare per rivelare il neutrino, distinguendolo dall'antineutrino? Una possibilità (seguendo un suggerimento del fisico italiano Bruno Pontecorvo) la dava il cloro 37, che costituisce circa un quarto di tutti gli atomi di cloro. Il suo nucleo contiene 17 protoni e 20 neutroni; se uno di questi ultimi assorbe un neutrino, diventa un protone (emettendo un elettrone). Il nucleo avrà allora 18 protoni e 19 neutroni, e sarà argo 37.

Per ottenere un bersaglio sufficientemente esteso di nuclei di cloro si potrebbe far ricorso al cloro liquido, che però è una sostanza molto corrosiva e tossica, che pone problemi di refrigerazione per essere mantenuta allo stato liquido. Al suo posto si possono usare composti organici che contengono cloro; particolarmente adatto allo scopo è il composto che va sotto il nome di "tetracloroetilene".

Il fisico americano Raymond R. Davis fece uso di questa trappola per neutrini nel 1956, allo scopo di dimostrare che c'era una differenza tra neutrino e antineutrino. Supponendo che le due

particelle fossero diverse, la trappola avrebbe catturato solo i neutrini e non gli antineutrini. Quando fu collocata vicino a un reattore nucleare, nel 1956, in condizioni tali in cui avrebbe certamente rivelato la presenza di antineutrini, qualora essi fossero stati identici ai neutrini, la trappola non catturò alcun antineutrino.

Il passo successivo consisteva nel cercare di rivelare i neutrini provenienti dal sole. Un enorme serbatoio contenente circa 400 mila litri di tetracloroetilene venne usato allo scopo, collocandolo in una profonda miniera del Sud Dakota. La terra sovrastante era sufficiente ad assorbire qualsiasi particella proveniente dal sole, salvo i neutrini. (Siamo di fronte alla strana situazione che, per studiare il sole, dobbiamo scendere a grande profondità nelle viscere della terra.) La vasca rimase esposta ai neutrini solari per parecchi mesi, affinché si accumulasse abbastanza argo 37 da essere osservabile. Poi la si ripulì con elio per ventidue ore, e si determinò la piccolissima quantità di argo 37 presente nell'elio gassoso. In tal modo. nel 1968 i neutrini solari furono osservati, ma in una quantità pari solo a un terzo di quella prevista dalle teorie correnti sui fenomeni che avvengono all'interno del sole: questo fatto era fonte di grave perplessità; ci ritorneremo in questo stesso capitolo.

L'INTERAZIONE NUCLEARE.

Il nostro elenco delle particelle subatomiche ora ne contiene dieci: quattro particelle di massa elevata (o "barioni", dalla parola greca che significa «pesante») - il protone, il neutrone, l'antiprotone e l'antineutrone; quattro leptoni - l'elettrone, il positrone, il neutrino e l'antineutrino; e due bosoni - il fotone e il gravitone.

Eppure non bastano, come compresero i fisici in base alle seguenti considerazioni.

L'ordinaria attrazione tra protoni ed elettroni isolati e l'ordinaria repulsione tra due protoni o tra due elettroni possono essere spiegate facilmente come conseguenze delle "interazioni elettromagnetiche".

Anche il legame che tiene uniti due atomi o due molecole può essere spiegato in termini di interazioni elettromagnetiche - cioè dell'attrazione tra i nuclei carichi positivamente e gli elettroni esterni.

Finché si pensava che il nucleo atomico fosse fatto di protoni e di elettroni sembrava ragionevole supporre che l'interazione elettromagnetica - l'attrazione complessiva tra protoni ed elettroni - bastasse a spiegare anche come il nucleo potesse stare insieme; quando, però, dopo il 1930, venne accettata la teoria protone-neutrone sulla struttura nucleare, si dovette riconoscere con sgomento che non si sapeva spiegare cosa tenesse insieme il nucleo.

Se i protoni erano le uniche particelle cariche presenti, l'interazione elettromagnetica doveva consistere in una forte repulsione tra i protoni stessi, tutti ammassati all'interno del nucleo, a così breve distanza. Il nucleo di qualsiasi atomo avrebbe dovuto esplodere con forza dirompente nell'istante stesso in cui si fosse formato (sempre che fosse riuscito, in qualche modo, a formarsi).

Evidentemente doveva esserci in gioco qualche altro tipo d'interazione, qualcosa di assai più forte dell'interazione elettromagnetica, qualcosa che fosse capace di superare quest'ultima.

Nel 1930, l'unica altra interazione nota era l'"interazione gravitazionale", che è talmente più debole di quella elettromagnetica da autorizzare a trascurarla quando si considerano eventi subatomici. No, doveva esistere un'"interazione nucleare", un'interazione ancora sconosciuta, ma molto intensa.

Il fatto che l'interazione nucleare debba essere molto più intensa si può dimostrare con il seguente ragionamento: si possono allontanare dal nucleo di un atomo di elio i suoi due elettroni con un'energia di 54 elettronvolt: tale quantità di energia è sufficiente a controllare una rilevante manifestazione dell'interazione elettromagnetica.

D'altra parte, per separare il protone e il neutrone che costituiscono un deutone (un nucleo che presenta un legame tra i più deboli), occorrono 2 milioni di elettronvolt: pur tenendo conto del

fatto che le particelle all'interno del nucleo sono molto più vicine tra loro di quanto non siano gli atomi in una molecola, si può ugualmente concludere che l'interazione nucleare è circa 130 volte più intensa dell'interazione elettromagnetica.

Ma qual è la natura di questa interazione nucleare? La prima indicazione proficua si ebbe nel 1932, allorché Werner Heisenberg avanzò l'ipotesi che i protoni fossero tenuti insieme da "forze di scambio". Egli immaginò che i protoni e i neutroni nel nucleo si scambiassero in continuazione le identità, talché una particella sarebbe prima un protone, poi un neutrone, poi ancora un protone e così via. Questo processo sarebbe in grado di mantenere stabile il nucleo, un po' come accade quando, per tenere una patata bollente, la si passa rapidamente da una mano all'altra. Prima che un protone si potesse (per così dire) «render conto» di essere un protone e cercasse di allontanarsi dai protoni suoi vicini, era diventato un neutrone e poteva restare là dove si trovava. Ovviamente il trucco poteva funzionare solo se gli scambi avevano luogo con una rapidità eccezionale, diciamo entro un trilionesimo di trilionesimo di secondo.

Un altro modo di considerare questa interazione è quello di immaginare due particelle che se ne scambiano una terza. Ogni volta che una particella A emette la particella di scambio, deve rinculare per conservare la quantità di moto; ogni volta che una particella B riceve la particella di scambio, anch'essa viene respinta all'indietro, per la stessa ragione. Mentre la particella di scambio rimbalza avanti e indietro, le particelle A e B si allontanano sempre più l'una dall'altra, proprio come accadrebbe se subissero una mutua repulsione.

Se, invece, la particella di scambio segue un percorso simile a quello di un boomerang, spostandosi da dietro la particella A a dietro la particella B, allora le due particelle vengono avvicinate, come se subissero un'attrazione.

In base alla teoria di Heisenberg tutte le forze di attrazione e di repulsione sarebbero il risultato di scambi di particelle. Nel caso dell'attrazione e della repulsione elettromagnetiche, la particella di scambio sarebbe il fotone, mentre nel caso dell'attrazione gravitazionale (in cui non sembra esservi repulsione) la particella è il gravitone.

Tanto il fotone quanto il gravitone sono privi di massa, e sembra questa la ragione per cui l'elettromagnetismo e la gravitazione sono forze che diminuiscono solo con il quadrato della distanza, il che consente di avvertirle anche a distanze enormi.

Le interazioni elettromagnetica e gravitazionale sono "interazioni a lungo raggio d'azione"; per quanto ne sappiamo fino a oggi, sono le uniche esistenti di questo tipo.

L'interazione nucleare - ammesso che esistesse - non poteva essere di questo tipo: essa doveva essere molto intensa all'interno del nucleo, se si voleva che il nucleo fosse stabile; ma era praticamente inosservabile all'esterno del nucleo, altrimenti sarebbe stata scoperta molto tempo prima. Pertanto, l'intensità dell'interazione nucleare doveva diminuire molto rapidamente con la distanza: per ogni raddoppio della distanza, tale forza si riduceva forse a meno di 1 su 100 del suo valore precedente, anziché ridursi a 1 su 4 come avveniva per le interazioni elettromagnetica e gravitazionale. Per questa ragione, si doveva respingere l'ipotesi di una particella di scambio priva di massa.

IL MUONE.

Nel 1935, il fisico giapponese Hideki Yukawa analizzò da un punto di vista matematico il problema: una particella di scambio dotata di massa avrebbe prodotto un campo di forze a breve raggio. La massa sarebbe stata inversamente proporzionale al raggio: maggiore la massa, minore il raggio. Risultò che la massa appropriata per tale particella doveva essere compresa tra quella del protone e quella dell'elettrone; Yukawa stimò che dovesse essere tra 200 e 300 volte quella dell'elettrone.

Appena un anno dopo, fu scoperta proprio una particella di questo tipo. Carl Anderson (lo scopritore del positrone), mentre studiava al California Institute of Technology le tracce dei raggi

cosmici secondari, s'imbatté in una traccia breve, che era troppo curva per appartenere a un protone e troppo poco curva per essere di un elettrone. In altre parole, si trattava di una particella di massa intermedia. Ben presto vennero scoperte molte altre tracce simili, e le particelle vennero denominate "mesotroni", o più brevemente "mesoni".

In seguito furono scoperte altre particelle aventi masse intermedie di questo ordine di grandezza: quella scoperta per prima fu chiamata "mesone mu", o "muone". («Mu» è una lettera dell'alfabeto greco; oggi sono state ormai usate quasi tutte le lettere greche per indicare le particelle subatomiche.) Come nel caso delle particelle menzionate in precedenza, il muone esiste in due varietà, positivo e negativo.

Il muone negativo, la cui massa è 206,77 volte quella dell'elettrone (e quindi circa 1 su 9 di quella del protone), è la particella; il muone positivo è l'antiparticella; essi corrispondono rispettivamente all'elettrone e al positrone; anzi, attorno al 1960 era ormai evidente che il muone negativo era identico all'elettrone in tutto, fuorché nella massa: era dunque un elettrone pesante, così come il muone positivo era un "positrone pesante".

I muoni positivo e negativo si annichilano a vicenda; prima che ciò avvenga, essi possono per breve tempo girare intorno a un comune centro di forza, così come fanno l'elettrone positivo e quello negativo. Una variante di questa situazione fu scoperta nel 1960 dal fisico americano Vernon Willard Hughes, che riuscì a osservare un sistema formato da un elettrone che girava intorno a un muone positivo; egli denominò tale sistema "muonio" (mentre un positrone che gira intorno a un muone negativo costituirebbe un "antimuonio").

L'atomo del muonio (se così è lecito chiamarlo) è assai simile all'idrogeno 1, in cui un elettrone gira intorno a un protone (positivo); i due hanno anche molte proprietà analoghe. Anche se muoni ed elettroni appaiono identici salvo che per la massa, questa differenza di massa è sufficiente perché l'elettrone e il muone positivo non siano degli autentici opposti: pertanto essi non si annichilano tra loro. Per questa ragione, il muonio non ha il tipo di instabilità che caratterizza il positronio; il muonio ha vita media più lunga, anzi sarebbe stabile (se non perturbato dall'esterno), se non fosse per il fatto che proprio il muone è molto instabile (come spiegherò tra breve).

Un'altra analogia tra muoni ed elettroni è la seguente: le particelle pesanti, così come possono produrre elettroni più antineutrini (come nel caso in cui un neutrone decade in un protone) o positroni più neutrini (come nel caso in cui un protone decade in un neutrone), possono anche interagire formando muoni negativi più antineutrini o muoni positivi più neutrini. Per anni i fisici considerarono cosa certa che i neutrini che accompagnano elettroni e positroni e i neutrini che accompagnano muoni negativi e positivi fossero identici; ma nel 1962 si scoprì invece che i neutrini non sono, per così dire, interscambiabili: cioè il neutrino dell'elettrone non partecipa ad alcuna interazione in cui si produca un muone, mentre il neutrino del muone non partecipa ad alcuna interazione che dia origine a un elettrone o a un positrone.

In breve, i fisici si ritrovarono con due coppie di particelle senza carica e senza massa: l'antineutrino dell'elettrone e il neutrino del positrone, più l'antineutrino del muone negativo e il neutrino del muone positivo. Quale sia la differenza tra i due neutrini e quella tra i due antineutrini è qualcosa che nessuno oggi saprebbe spiegare; ma tale differenza c'è.

I muoni differiscono dall'elettrone e dal positrone sotto un altro aspetto, quello della stabilità. L'elettrone o il positrone, lasciati a se stessi, restano inalterati indefinitamente; il muone, invece, è instabile, e si disintegra dopo una vita media di due milionesimi di secondo. Il muone negativo decade in un elettrone (più un antineutrino elettronico e un neutrino muonico); il muone positivo a sua volta dà origine a un positrone, un neutrino elettronico e un antineutrino muonico.

Quando un muone si disintegra, quindi, dà origine a un elettrone (o a un positrone) con meno di 1 su 200 della sua massa, e a due neutrini privi di massa. Che accade, allora, del rimanente 99,5 per cento della sua massa? Evidentemente si trasforma in energia, che può essere emessa sotto forma di fotoni, oppure spesa nella formazione di altre particelle.

Inversamente, se si concentra abbastanza energia in un volume molto piccolo, invece di dare origine a una coppia elettrone-positrone, si può dare origine a una coppia più «gonfia»: una coppia simile a quella elettrone-positrone, salvo per l'eccesso di energia che si manifesta come massa. La massa in più non ha un'«adesione» molto forte all'elettrone o al positrone; pertanto il muone è instabile, si libera ben presto dalla massa addizionale, diventando un elettrone o un positrone.

IL TAUONE.

Naturalmente, se in un piccolissimo volume si concentra ancora più energia, si formerà un elettrone di massa ancora maggiore. In California, Martin L. Perl, facendo scontrare frontalmente in un acceleratore elettroni e positroni di alta energia, nel 1974 trovò traccia dell'esistenza di un siffatto elettrone superpesante, a cui è stato dato il nome di "elettrone tau", o, più brevemente, "tauone" («tau» è un'altra lettera dell'alfabeto greco).

Come c'era da aspettarsi, esso ha una massa che è circa 17 volte quella del muone e, pertanto, circa 3500 volte quella dell'elettrone.

In pratica, il tauone ha massa doppia di quella del protone e del neutrone. Nonostante ciò, esso è un leptone, perché ha tutte le proprietà dell'elettrone, salvo la massa e la stabilità. Era prevedibile che fosse assai più instabile del muone, data la sua massa; così infatti è; il tauone ha una vita media di solo un trilionesimo di secondo circa, poi decade in un muone (e quindi in un elettrone).

Ovviamente esistono un tauone positivo e uno negativo, e i fisici sono sicuri che a essi siano associati un neutrino e un antineutrino di un terzo tipo, anche se per il momento questi non sono ancora stati osservati.

LA MASSA DEL NEUTRINO.

Dunque ora conosciamo dodici leptoni: l'elettrone negativo e positivo (quest'ultimo chiamato positrone), il muone negativo e positivo, il tauone negativo e positivo, il neutrino e l'antineutrino elettronici, il neutrino e l'antineutrino muonici e il neutrino e l'antineutrino tauonici. Evidentemente sono suddivisi in tre livelli o, come usano dire oggi i fisici, in tre «sapori» ("flavors"). Ci sono l'elettrone e il neutrino associato, con le loro antiparticelle; il muone e il neutrino associato, con le loro antiparticelle; e il tauone e il neutrino associato, con le loro antiparticelle.

Se vi sono tre sapori, non c'è ragione per cui non debbano essercene altri. Forse, se si potesse aumentare indefinitamente l'energia utilizzabile, si formerebbero leptoni di sempre nuovi sapori, ciascuno dotato di massa maggiore e stabilità minore del precedente. Anche se forse non esiste un limite teorico al numero dei sapori, naturalmente ne esiste uno pratico. Al limite, potrebbe occorrere tutta l'energia dell'universo per formare un leptone di livello particolarmente alto, oltre al quale non sarebbe possibile andare; e una siffatta particella sarebbe talmente instabile che la sua esistenza sarebbe priva di significato da tutti i punti di vista.

Anche limitandosi a considerare i tre sapori oggi noti, ci si trova di fronte al mistero dei neutrini. Come possono esistere tre coppie di fermioni senza massa, senza carica, nettamente differenti agli effetti delle interazioni tra particelle, eppure privi di proprietà che li diversifichino, almeno per quanto ne sappiamo?

Forse una proprietà che li distingua esiste, ma non l'abbiamo cercata nel modo giusto. Per esempio, si ritiene che i neutrini dei tre sapori abbiano tutti massa zero, e pertanto viaggino sempre alla velocità della luce. Ma supponiamo ora che il neutrino di ciascun sapore abbia una massa, anche piccolissima, che sia diversa da quella degli altri due. In tal caso, le proprietà dell'uno sarebbero naturalmente un poco diverse da quelle dell'altro. Per esempio, ciascuno di loro

viaggerebbe a una velocità inferiore, anche se di pochissimo, a quella della luce, e tale scarto differirebbe da un neutrino all'altro.

In questo caso si potrebbe sostenere a livello teorico che un qualsiasi neutrino, muovendosi, cambia la propria identità, passando da neutrino elettronico a neutrino muonico e quindi tauonico; questi mutamenti rappresentano le cosiddette "oscillazioni del neutrino" - un'ipotesi avanzata per la prima volta nel 1963 da un gruppo di fisici giapponesi.

Verso la fine degli anni settanta Frederik Reines, uno degli scopritori del neutrino, insieme a Henry W. Sobel e a Elaine Pasierb dell'Università di California, volle controllare questa ipotesi. Essi bombardarono circa 270 chili di acqua pesante molto pura con neutrini provenienti dalla fissione dell'uranio: questo processo avrebbe dovuto produrre "solo" neutrini elettronici.

I neutrini possono avere due tipi di effetti: in primo luogo, un neutrino può colpire la combinazione protone-neutrone del nucleo del deuterio presente nell'acqua pesante, scindendola e seguitando poi la propria corsa. Questa è una "interazione di corrente neutra", e può essere prodotta da un neutrino di qualsiasi sapore. In secondo luogo, un neutrino, colpendo la combinazione protone-neutrone, può indurre un decadimento del protone in un neutrone, producendo un elettrone; in questo caso, il neutrino cessa di esistere; è questa una "interazione di corrente carica", e sono solo i neutrini elettronici che possono provocarla.

Si può calcolare il numero di eventi di ciascuna classe che dovrebbero verificarsi sia nel caso in cui i neutrini non oscillassero, rimanendo neutrini elettronici, sia in quello in cui oscillassero, cambiando la propria identità. Nel 1980, Reines annunciò che il suo esperimento sembrava dimostrare l'esistenza dell'oscillazione del neutrino. (Dico «sembrava» perché si tratta di un esperimento al limite del possibile e perché altri analoghi esperimenti hanno dato risultati opposti.)

La questione resta dunque sospesa, ma esperimenti effettuati da fisici moscoviti a proposito di tutt'altro problema sembrano aver dimostrato che il neutrino elettronico avrebbe una massa che potrebbe aggirarsi sui 40 elettronvolt, il che significa 1 su 13 mila della massa dell'elettrone; non c'è dunque da meravigliarsi se si era creduto che la particella fosse priva di massa.

Se Reines è nel giusto, cioè se esiste l'oscillazione del neutrino, sarebbe spiegata la scarsità dei neutrini provenienti dal sole, di cui ho fatto già cenno in questo capitolo, e che tanto sconcerta i fisici.

Il sistema escogitato da Davis per rivelare i neutrini solari catturerebbe solo neutrini elettronici. Se i neutrini emessi dal sole oscillano, arrivando sulla terra sotto forma di un miscuglio dei tre sapori, magari in quantità uguali, non fa meraviglia che troviamo solo un terzo dei neutrini previsti.

Inoltre, se i neutrini hanno una sia pur piccolissima massa, anche solo 1 su 13 mila di quella dell'elettrone, essi sono talmente numerosi nello spazio che si può calcolare che nell'insieme superino la massa di tutti i protoni e i neutroni. Più del 99 per cento della massa dell'universo sarebbe in tal caso fatta di neutrini; essi potrebbero senz'altro rappresentare la «massa mancante» di cui ho parlato nel capitolo secondo. In effetti, ci sarebbe nell'universo una massa di neutrini sufficiente a renderlo chiuso, assicurando che l'espansione prima o poi cesserà, e l'universo ricomincerà a contrarsi.

Tutto ciò, però, solo se Reines è nel giusto: cosa che ancora non sappiamo.

ADRONI E QUARK.

Il muone, essendo una sorta di elettrone pesante, non può essere quel cemento nucleare di cui andava alla ricerca Yukawa; e siccome non ci sono elettroni nel nucleo, non ci dovrebbe essere neppure il muone.

Questo fatto fu stabilito su basi puramente sperimentali assai prima che si sospettasse la quasi identità di muoni ed elettroni; semplicemente, i muoni non mostravano alcuna tendenza a interagire con i nuclei. Per un certo periodo, la teoria di Yukawa sembrò vacillare.

PIONI E MESONI.

Nel 1947, però, il fisico inglese Cecil Frank Powell scoprì un altro tipo di mesone nelle fotografie delle tracce dei raggi cosmici; esso aveva una massa leggermente superiore a quella del muone, e pari a 273 volte la massa dell'elettrone. Al nuovo mesone venne dato il nome di "mesone pi", o "pione".

Si verificò che il pione interagiva fortemente con il nucleo, ed era esattamente la particella prevista da Yukawa. (Yukawa ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1949, mentre Powell lo ricevette nel 1950.) In realtà, esisteva un pione positivo che fungeva da particella di scambio tra protoni e neutroni, ed esisteva anche l'antiparticella corrispondente, il pione negativo, che svolgeva una funzione analoga con antiprotoni e antineutroni. Entrambi hanno vite medie ancora più brevi di quelle dei muoni: dopo una vita media di circa 1 su 40 di microsecondo, si disintegrano dando origine a muoni più neutrini muonici. (Naturalmente, in seguito il muone si disintegra dando origine a elettroni e ad altri neutrini.) Esiste anche un pione neutro, che è l'antiparticella di se stesso. (In altre parole, si tratta di una particella della quale esiste una sola varietà.) È estremamente instabile, e si disintegra in meno di un quintilionesimo di secondo, formando una coppia di fotoni gamma.

Anche se è vero che il pione «fa parte» del nucleo, a volte gli gira fuggevolmente intorno prima di interagire con esso: in tal caso si forma un atomo pionico, come si scoprì nel 1952. In realtà per qualsiasi coppia di particelle (o di sistemi di particelle) di segno opposto si può fare in modo che l'una si metta a girare intorno all'altra; negli anni sessanta i fisici si accinsero allo studio di parecchi «atomi esotici», dal carattere evanescente, sperando di riuscire a saperne di più sulla struttura delle particelle.

I pioni furono i primi a essere scoperti di un'intera classe di particelle, che vengono raggruppate sotto la denominazione di "mesoni". Di esse "non" fa parte il muone, anche se in origine era stata proprio questa la prima particella a essere denominata così. I mesoni interagiscono intensamente con i protoni e i neutroni; i muoni invece no, ed è questa la ragione per cui hanno perso il diritto di essere inclusi in tale classe.

Un altro esempio di particella - oltre al pione - che faccia parte del gruppo è il "mesone K", o "kaone", che fu scoperto nel 1952 da due fisici polacchi, Marian Danysz e Jerzy Pniewski. La sua massa è 970 volte quella dell'elettrone, e quindi circa la metà della massa del protone o del neutrone. Esistono due varietà di kaoni, una positiva e una neutra, ciascuna con la propria antiparticella. Naturalmente sono instabili, e decadono dando origine a pioni in circa un microsecondo.

BARIONI.

Per masse superiori a quelle dei mesoni si hanno i barioni (di cui ho già parlato). Di questi ultimi fanno parte i protoni e i neutroni, che ne costituirono gli unici esempi noti fino agli anni cinquanta.

Tuttavia, a partire dal 1954 si scoprì una serie di particelle di massa ancora maggiore, che talora vengono chiamate "iperoni". Sono stati proprio i barioni le particelle che più hanno proliferato negli ultimi anni; il protone e il neutrone non sono che le due particelle più leggere di una classe molto ampia.

I fisici hanno scoperto una "legge di conservazione del numero barionico": in tutti i processi di decadimento delle particelle il numero totale dei barioni (cioè la differenza tra numero dei barioni e numero degli antibarioni) resta sempre lo stesso. Il decadimento porta sempre da una particella di maggior massa a una di massa minore, il che spiega come mai il protone sia stabile, anzi sia l'"unico" barione a esserlo. Il fatto è che il protone è il barione più leggero: se si

disintegrasse, dovrebbe cessare di essere un barione, venendo meno alla legge di conservazione del numero barionico. Anche l'antiprotone è stabile per questa stessa ragione, essendo il più leggero antibarione esistente. Naturalmente, un protone e un antiprotone possono invece dar luogo a un processo di mutua annichilazione, perché, presi insieme (essendo un barione e un antibarione), hanno come numero barionico totale zero.

(Esiste anche una "legge di conservazione del numero leptonico", che spiega perché elettrone e positrone sono gli "unici" leptoni a essere stabili; essi sono i leptoni di massa più piccola e non possono disintegrarsi in nulla di più semplice senza violare la legge di conservazione. In realtà c'è una seconda ragione che impedisce a elettroni e positroni di decadere: essi sono le particelle di massa più piccola che possano avere una carica elettrica. Se decadessero in qualcosa di più semplice, perderebbero tale carica - ma questa perdita è vietata dalla "legge di conservazione della carica elettrica". Quest'ultima è una legge di conservazione più fondamentale di quella della conservazione del numero barionico, come vedremo; pertanto elettroni e positroni sono, sotto un certo aspetto, più stabili di protoni e antiprotoni - o, almeno, "può" darsi che lo siano.)

I primi barioni scoperti dopo il protone e il neutrone sono stati indicati con le lettere dell'alfabeto greco: ci furono così una "particella lambda", una "particella sigma" e una "particella csi". La prima di queste si presentava in una sola varietà, neutra; la seconda in tre varietà, positiva, negativa e neutra; la terza in due varietà, negativa e neutra. Ciascuna di queste particelle aveva la propria antiparticella, così che in tutto facevano dodici particelle. Tutte quante erano estremamente instabili: nessuna poteva vivere per più di un centesimo di microsecondo circa; qualcuna poi, come la particella sigma neutra, si disintegrava dopo un centesimo di trilionesimo di microsecondo.

La particella lambda, essendo neutra, può sostituire un neutrone nel nucleo, formando un "ipernucleo" - un'entità che dura meno di un miliardesimo di secondo: il primo oggetto del genere a essere scoperto fu un nucleo di ipertrizio, costituito di un protone, un neutrone e una particella lambda: esso fu individuato tra i prodotti della radiazione cosmica da Danysz e Pniewski nel 1952. Danysz, nel 1963, riferì di aver trovato ipernuclei che contenevano due particelle lambda. Inoltre, si può fare in modo di sostituire con iperoni negativi alcuni elettroni della struttura atomica: ciò fu realizzato nel 1968: Queste particelle di massa elevata che sostituiscono gli elettroni girano intorno al nucleo così da presso che si può dire che passino la loro vita in pratica entro le regioni più esterne del nucleo stesso.

Tutte queste sono comunque particelle relativamente stabili, che vivono abbastanza a lungo da consentire di rivelarne la presenza, stabilendone l'identità e la vita media. Negli anni sessanta venne scoperta da Alvarez (che ricevette per questo il premio Nobel per la fisica nel 1968) la prima di una serie di particelle che avevano vita così breve che la loro esistenza poteva solo essere postulata per spiegare i prodotti della loro disintegrazione: le loro vite medie sono dell'ordine di pochi trilionesimi di un trilionesimo di secondo, tanto che ci si può chiedere se sono realmente singole particelle, o non piuttosto una combinazione di due o tre particelle, che per un breve istante sostano per farsi un cenno di saluto, per poi riprendere subito la loro fuga.

Queste entità dalla vita ultrabreve vengono chiamate "risonanze"; man mano che i fisici poterono disporre di energie sempre maggiori, continuarono a produrre sempre nuove particelle, finché queste salirono a 150 e più, tutte appartenenti alle famiglie dei mesoni e dei barioni; questi due gruppi vennero poi conglobati in uno solo, detto degli "adroni" (dalla parola greca che significa «forte»). I leptoni invece non andarono al di là dei tre sapori, ciascuno composto di particella, antiparticella, neutrino e antineutrino.

I fisici cominciarono a sentirsi a disagio a causa del gran numero di adroni, così come lo erano stati i chimici un secolo prima a causa del moltiplicarsi degli elementi. Si cominciò a sospettare che gli adroni dovessero esser fatti di particelle più semplici. A differenza dei leptoni, gli adroni non erano puntiformi, ma avevano un diametro definito - non molto grande, certo, dell'ordine del trilionesimo di millimetro - il che, comunque, li rendeva ben diversi da un punto.

Negli anni cinquanta il fisico americano Robert Hofstadter indagò la struttura dei nuclei usando elettroni di energia estremamente alta, i quali non interagivano con i nuclei stessi, ma rimbalzavano via; in base alle loro traiettorie, Hofstadter riuscì a formulare alcune ipotesi sulla struttura degli adroni; le sue conclusioni, pur dimostrandosi in seguito inadeguate, costituirono tuttavia un buon punto di partenza; egli ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1961.

LA TEORIA DEI QUARK.

Ciò che sembrava necessario era una sorta di tavola periodica delle particelle subatomiche - qualcosa che riuscisse a raggrupparle in famiglie, formate da uno o più membri fondamentali e da altre particelle che rappresentassero lo stato di eccitamento di uno o più membri fondamentali.

Qualcosa del genere venne proposto nel 1961 dal fisico americano Murray Gell-Mann e dal fisico israeliano Yuval Nèemen, che avevano lavorato in modo indipendente. Le particelle vennero riunite in gruppi, in base alle loro proprietà, secondo uno schema perfettamente simmetrico, cui Gell-Mann diede il nome di "eightfold way" (ottuplice via), ma che in linguaggio formale si indica con la sigla SU(3). Per completare uno di questi raggruppamenti mancava una particella, la quale, per andar bene, doveva avere una data massa e un dato insieme di altre proprietà, che non costituivano una combinazione molto probabile per una particella; ciononostante nel 1964 fu scoperta una particella, la "omega meno", che aveva appunto l'insieme di proprietà previsto; negli anni successivi, essa fu osservata ancora decine di volte. Nel 1971 fu poi scoperta la sua antiparticella, l'"antiomega meno".

Anche se i barioni erano stati suddivisi in gruppi, ottenendo una sorta di tavola periodica subatomica, restavano ancora abbastanza particelle diverse perché i fisici sentissero l'urgenza di trovare qualcosa di ancora più semplice e fondamentale. Nel 1964 Gell-Mann - che era alla ricerca del modo più semplice di render conto di tutti i barioni con un numero minimo di "particelle sub-barioniche" più fondamentali - propose il concetto di "quark". Scelse questo nome perché era giunto alla conclusione che per fare un barione bastava una combinazione di tre quark e che le diverse combinazioni dei tre quark erano sufficienti per costituire tutti i barioni noti, il che gli aveva richiamato alla mente un verso del "Finnegan's Wake" di James Joyce: «Three quarks for Muster Mark».

Per spiegare le proprietà note dei barioni, i tre quark dovevano avere a loro volta certe proprietà ben definite, la più sorprendente delle quali era una carica elettrica frazionaria. Tutte le particelle note, o non avevano carica elettrica, o ne avevano una esattamente uguale a quella dell'elettrone (o del positrone), o infine avevano una carica esattamente multipla di quella dell'elettrone (o del positrone). In altre parole, le cariche note erano 0, + 1, meno 1, +2, meno 2 eccetera. L'idea di una carica frazionaria era così strana, che la proposta di Gell-Mann incontrò all'inizio una forte resistenza. Ma il fatto che con questo concetto Gell-Mann riuscisse a spiegare tante cose gli valse dapprima un ascolto rispettoso, poi un seguito sempre più vasto, infine un premio Nobel per la fisica, nel 1969.

Gell-Mann partiva, per esempio, da due quark, che sono noti oggi come "quark up" e "quark down", dove "up" (su) e "down" (giù) non vanno intesi in senso realistico, ma sono solo una denominazione di fantasia. (Non si deve credere che gli scienziati, e tanto meno quelli più giovani, siano macchine pensanti senza anima e senza emozioni; al contrario, amano scherzare, e talora dire sciocchezze, proprio come possono fare un romanziere o un camionista.) Solitamente, essi vengono chiamati "quark u" e "quark d".

Il quark u ha carica + 2 su 3 e il quark d ha carica meno 1 su 3; non basta: c'è anche un "antiquark u", con carica meno 2 su 3 e un "antiquark d", con carica + 1 su 3.

Due quark u e un quark d avranno cariche + 2 su 3, + 2 su 3 e meno 1 su 3, cioè in totale + 1, così che formeranno, in combinazione, un protone; d'altra parte, due quark d e un quark u

avranno cariche meno 1 su 3, meno 1 su 3 e + 2 su 3, cioè in totale 0, e formeranno in combinazione un neutrone.

Tre quark si combineranno sempre in modo che la carica totale sia un numero intero: così, due antiquark u e un antiquark d avranno una carica totale pari a meno 1, formando un antiprotone, mentre due antiquark d e un antiquark u avranno carica totale 0 e formeranno un antineutrone.

Inoltre, i quark si uniscono così saldamente, grazie all'interazione nucleare, che fino a oggi gli scienziati non sono riusciti a spezzare protoni e neutroni nei singoli quark. Sembra, anzi, che l'attrazione tra quark cresca con la distanza, così che non ci sarebbe alcun sistema per scindere un protone o un neutrone nei quark che lo compongono; in tal caso, le cariche frazionarie potranno anche esistere, ma non potranno mai essere osservate, il che rende più facile accettare l'idea dissacratoria di Gell-Mann.

Tuttavia questi due quark non bastano da soli a rendere ragione di tutti i barioni o di tutti i mesoni (che sono costituiti da combinazioni di "due" quark). Gell-Mann aveva ipotizzato originariamente l'esistenza di un terzo quark, che oggi viene chiamato "quark s", dove s si potrebbe dire sia l'iniziale di "sideways" (di lato) per analogia con up e down; più spesso, però, si spiega la s come iniziale di "strangeness" (stranezza), perché il quark s è stato usato per spiegare la struttura delle cosiddette "particelle strane" - che devono il loro nome al fatto di avere vita media superiore a quella per esse prevista.

Comunque, i fisici che studiavano l'ipotesi dei quark finirono per stabilire che questi dovevano esistere a coppie: se c'era un quark s, doveva esserci anche un suo compagno, che chiamarono "quark c" (dove peraltro c non è l'iniziale di «compagno», ma di "charm", incanto).

Nel 1974 i fisici americani Burton Richter e Samuel Chao Chung Ting, lavorando indipendentemente e usando energie molto elevate, isolarono delle particelle che avevano proprietà che richiedevano il quark c. (Erano particelle dotate di "charm".) I due scienziati condivisero il premio Nobel per la fisica nel 1976.

Ciascuna coppia di quark costituisce un sapore, e, sotto certi aspetti, tali sapori corrispondono a quelli dei leptoni. Ogni sapore dei quark ha quattro membri - per esempio, il quark u, il quark d, l'antiquark u e l'antiquark d - esattamente come ogni sapore dei leptoni ha quattro membri - per esempio l'elettrone, il neutrino, il positrone e l'antineutrino. In entrambi i casi i sapori noti, comunque, sono tre: elettrone, muone e tauone tra i leptoni, i quark u e d, i quark s e c, e infine i "quark t" e "b". Qui "t" sta per "top" (cima) e "b" sta per "bottom" (fondo); esiste però una versione fantasiosa, secondo cui le due lettere starebbero per "truth" (verità) e "beauty" (bellezza). I quark, come i leptoni, sembrano essere particelle fondamentali, puntiformi e prive di struttura (cosa però di cui è meglio non essere tanto certi, visto che siamo già stati giocati a questo proposito prima dall'atomo, poi dal protone). Potrebbe inoltre darsi che per entrambi i gruppi vi sia un numero di sapori indefinito, e che potremmo osservarli tutti, se avessimo sempre maggior energia da impiegare a questo scopo.

Una differenza enorme tra leptoni e quark è evidenziata dal fatto che i leptoni hanno cariche intere o non ne hanno affatto, e non si combinano, mentre i quark hanno cariche frazionarie e, a quanto pare, esistono solo in combinazione.

I quark si combinano secondo regole determinate: ogni sapore di quark si presenta in tre diverse varietà - cosa che non avviene per i leptoni. La proprietà che differenzia queste tre varietà è chiamata "colore" (ma la cosa va intesa solo metaforicamente); le tre varietà sono indicate con i colori "rosso", "blu" e "verde".

Quando i quark si combinano a tre a tre per formare un barione, uno di essi deve essere rosso, uno blu e uno verde; la combinazione non ha colore, ossia è "bianca". (Ed è proprio per questo che sono stati scelti il rosso, il blu e il verde; perché nel mondo che ci circonda, come pure sugli schermi televisivi, questa combinazione dà il bianco.)

Quando i quark si combinano a due a due per formare un mesone, uno di essi sarà di un dato colore e l'altro del colore complementare, talché di nuovo daranno come risultato il bianco. (Quanto ai leptoni, non hanno colore, essendo di per sé bianchi.)

Lo studio delle combinazioni dei quark tali che il prodotto finale sia sempre privo di colore e dotato di carica intera viene chiamato "cromodinamica quantistica" (da "chroma", «colore» in greco). Questa espressione richiama il nome di una moderna e feconda teoria delle interazioni elettromagnetiche, l'"elettrodinamica quantistica".

Quando i quark si combinano, lo fanno mediante una particella di scambio che, seguitando a muoversi avanti e indietro, serve a tenerli insieme; tale particella di scambio viene chiamata "gluone", da «glue» (colla). Anche i gluoni hanno un colore, il che complica le cose; essi possono anche saldarsi l'uno all'altro, formando un prodotto chiamato "palla gluonica" ("glueball").

Anche se non è possibile spezzare gli adroni ottenendo dei singoli quark (due nel caso dei mesoni, tre nel caso dei barioni), vi sono modi più indiretti per dimostrare l'esistenza dei quark. È forse possibile ottenere dei quark dal nulla concentrando sufficiente energia in un piccolo volume, per esempio facendo scontrare tra loro fasci di elettroni e positroni di altissima energia (come nel caso della produzione del tauone).

I quark così ottenuti si combinerebbero istantaneamente in adroni e antiadroni, che schizzerebbero via in direzioni opposte. Se l'energia fosse "sufficiente", i getti sarebbero tre e formerebbero un trifoglio, fatto di adroni, antiadroni e gluoni. Una figura a due foglie è stata effettivamente realizzata; e, nel 1979, è stato annunciato che in alcuni esperimenti si stava cominciando a formare una rudimentale terza foglia. Questa viene considerata una importante conferma alla teoria dei quark.

I CAMPI.

Qualsiasi particella che possegga una massa è sorgente di un campo gravitazionale che si estende indefinitamente in tutte le direzioni e la cui intensità diminuisce proporzionalmente al quadrato della distanza dalla sorgente.

L'intensità del campo è incredibilmente piccola nel caso di particelle singole; così piccola che, quando si studiano le interazioni tra particelle, si può ignorare il campo a tutti gli effetti. Esiste comunque un solo tipo di massa, e l'interazione gravitazionale tra due particelle è sempre, a quanto se ne sa, di tipo attrattivo.

Inoltre il campo gravitazionale associato a un sistema di più particelle appare, da un punto esterno al sistema, come la somma di tutti i campi associati alle singole particelle. Il campo gravitazionale di un corpo come il sole o la terra è identico a quello previsto nel caso di un'unica particella dotata di tutta la massa del corpo e situata nel centro di gravità del corpo stesso. (Ciò è rigorosamente vero solo se il corpo è perfettamente sferico e ha densità uniforme, oppure se ha una densità che varia dal centro alla periferia, mantenendo una simmetria sferica: condizioni queste suppergiù soddisfatte per oggetti simili al sole e alla terra.)

Ne consegue che il sole e, in misura minore, la terra hanno campi gravitazionali di intensità enorme, così che possono interagire, attraendosi reciprocamente e restando saldamente legati, anche se sono alla distanza di 150 milioni di chilometri. Sistemi di galassie possono mantenersi uniti anche se sono dispersi a distanze di milioni di anni luce; e, se mai l'universo ricomincerà a contrarsi, lo farà in virtù dell'attrazione di gravità che agisce anche a distanza di miliardi di anni luce.

Ogni particella che abbia una carica elettrica è sorgente di un campo elettromagnetico che si estende indefinitamente in tutte le direzioni e la cui intensità diminuisce proporzionalmente al quadrato della distanza dalla sorgente. Se poi una particella possiede massa e carica elettrica (e non esiste carica elettrica senza massa), essa è sorgente di entrambi i campi.

L'INTERAZIONE ELETTROMAGNETICA.

L'intensità del campo elettromagnetico è molti trilioni di trilioni di trilioni di volte maggiore di quella del campo gravitazionale per qualsiasi singola particella; esistono, però, due tipi di cariche elettriche, positiva e negativa, così che il campo elettromagnetico presenta tanto il fenomeno dell'attrazione che quello della repulsione. Quando le cariche dei due tipi sono presenti in numero uguale, esse tendono a neutralizzarsi reciprocamente; allora fuori dal sistema non vi è campo elettromagnetico. Così, gli atomi in condizioni normali sono costituiti da un numero uguale di cariche negative e positive, e risultano quindi elettricamente neutri.

Quando la carica positiva o negativa è presente in eccesso si ha un campo elettromagnetico, ma la reciproca attrazione delle cariche opposte garantisce che qualsivoglia eccesso in un senso o nell'altro sarà di entità microscopica; i campi elettromagnetici eventualmente presenti non possono quindi competere per intensità con i campi gravitazionali di corpi grandi come un grosso asteroide, o più. Per questo Isaac Newton, che si occupò soltanto di campi gravitazionali, fu in grado di costruire una spiegazione soddisfacente dei moti dei corpi del sistema solare, spiegazione che poté poi essere estesa ai moti delle stelle e delle galassie.

Le interazioni elettromagnetiche, però, non possono essere ignorate del tutto: esse svolgono un ruolo nella formazione del sistema solare, nel trasferimento del momento angolare dal sole ai pianeti e probabilmente in alcune delle strane manifestazioni collegate agli anelli di minuscole particelle che circondano Saturno; si tratta, tuttavia, di effetti di secondaria importanza.

Ogni adrone (mesone o barione o quark costitutivo) è sorgente di un campo che si estende in tutte le direzioni indefinitamente; l'intensità di tale campo diminuisce tanto rapidamente con la distanza che non è possibile avvertirlo a distanze superiori a un diametro di nucleo atomico: in tal caso si può ignorare questo campo, che pure ha un'importanza preponderante all'interno del nucleo o quando due particelle a grande velocità si sfiorano a distanze nucleari; tale campo, quindi, non svolge alcuna parte per quanto riguarda i moti generali dei corpi astronomici, ma acquista importanza, per esempio, quando si indaga sui nuclei delle stelle.

Anche i leptoni sono sorgenti di un campo che può essere avvertito solo a distanze nucleari; esso ha addirittura un raggio minore di quello del campo degli adroni; pur essendo entrambi campi nucleari, essi sono molto diversi, non solo per il tipo di particelle a cui sono associati, ma anche per intensità. Il campo degli adroni ha, per ogni particella, un'intensità 137 volte maggiore di quella del campo elettromagnetico, mentre l'intensità del campo dei leptoni è soltanto un centomiliardesimo circa di quella del campo elettromagnetico. Per tali ragioni si definisce solitamente il campo degli adroni come "interazione forte", e quello dei leptoni come "interazione debole". (Si ricordi comunque che l'interazione debole è tale in confronto all'interazione forte e all'interazione elettromagnetica, ma è ancora 10 mila trilioni di trilioni di volte più intensa dell'interazione gravitazionale.)

Queste quattro interazioni, per quanto ne sappiamo fino a oggi, rendono ragione di tutti i comportamenti delle particelle, e quindi, indirettamente, di tutti i comportamenti misurabili, di qualsiasi sorta. Nulla per ora fa pensare che esista una quinta interazione, o che possa esistere. (Naturalmente, la frase precedente non equivale affatto a dire che, in base a queste quattro interazioni, noi possiamo oggi effettivamente capire tutti i comportamenti misurabili: sapere che una complessa equazione matematica ha una soluzione non significa essere sicuramente capaci di trovarla.)

L'interazione debole fu descritta matematicamente per la prima volta da Fermi nel 1934, ma restò poi per decenni la meno conosciuta delle quattro interazioni. Per esempio, tutte e quattro le interazioni dovrebbero avere particelle di scambio che mediano le interazioni stesse: per l'interazione elettromagnetica c'è il fotone, per quella gravitazionale il gravitone, per l'interazione forte a livello protone-neutrone il pione e per l'interazione forte a livello dei quark il gluone. Dovrebbe esistere una particella del genere anche per l'interazione debole, una "particella W"

(dall'iniziale di «weak», debole), ma, per più di mezzo secolo, questa particella è riuscita a eludere ogni ricerca.

LE LEGGI DI CONSERVAZIONE.

Vi è poi la questione delle leggi di conservazione, da cui dipendono le regole che consentono di dire quali interazioni tra particelle siano possibili e quali no, e quindi, più in generale, che cosa può accadere nell'universo e che cosa no. Senza le leggi di conservazione, gli eventi dell'universo sarebbero anarchici e totalmente incomprensibili.

I fisici nucleari hanno a che fare con una dozzina di leggi di conservazione: alcune sono quelle ben note della fisica del diciannovesimo secolo: la conservazione dell'energia, quella della quantità di moto, quella del momento angolare e quella della carica elettrica. Vi sono poi leggi di conservazione meno familiari: la conservazione della stranezza, la conservazione del numero barionico, quella dello spin isotopico, e altre ancora.

A quanto pare, le interazioni forti obbediscono a tutte queste leggi di conservazione, tanto che negli anni cinquanta i fisici consideravano cosa sicura che tali leggi fossero universali e irrevocabili. Ma non era così. Nel caso delle interazioni deboli, alcune delle leggi di conservazione vengono violate.

In particolare, la legge di conservazione che fu demolita per prima è quella di "conservazione della parità". La parità è una proprietà strettamente matematica, che non si può descrivere con esempi concreti; basterà dire che tale proprietà si riferisce a una funzione matematica che ha a che fare con le caratteristiche ondulatorie di una particella e con la sua posizione nello spazio. La parità ha due valori possibili - "pari" e "dispari". Ciò che qui importa è il fatto che la parità veniva considerata una proprietà fondamentale soggetta, come l'energia o la quantità di moto, a una legge di conservazione: in qualsiasi interazione o mutamento, la parità doveva essere conservata.

Ciò equivale a dire che si pensava che, quando le particelle interagendo danno origine a nuove particelle, nei due membri dell'equazione la parità deve essere uguale, proprio come accade per i numeri di massa, i numeri atomici o i momenti angolari.

Facciamo un esempio. Se una particella di parità pari e una di parità dispari interagiscono dando origine ad altre due particelle, una delle nuove particelle deve avere parità pari e l'altra parità dispari. Se due particelle di parità dispari danno luogo a due nuove particelle, queste devono essere o entrambe pari o entrambe dispari; inversamente, se una particella di parità pari si disintegra dando origine a due particelle, entrambe devono avere parità pari o parità dispari; se decade in tre particelle, tutte e tre devono avere parità pari o una parità pari e le altre due parità dispari. (La cosa risulta più chiara considerando cosa accade con i numeri pari e dispari, che seguono regole analoghe: per esempio, un numero pari può solo essere la somma di due numeri pari o di due numeri dispari, ma non di un numero pari e un numero dispari.)

I guai cominciarono quando ci si avvide che i mesoni K a volte si disintegravano in due mesoni pi (avendo il mesone pi parità dispari, la parità totale era pari) e altre volte davano origine a tre mesoni pi (parità totale dispari). I fisici ne conclusero che vi erano due tipi di mesoni K, uno di parità pari e uno di parità dispari, e li chiamarono rispettivamente "mesone theta" e "mesone tau".

Ora, i due mesoni, sotto tutti gli aspetti salvo la parità, erano identici: stessa massa, stessa carica, stessa stabilità, uguali sotto ogni aspetto. Era difficile da mandar giù l'idea di due particelle distinte con tutte le proprietà esattamente uguali. Era forse possibile che si trattasse in realtà di una stessa particella, e che ci fosse invece qualcosa di sbagliato nel concetto di conservazione della parità? Nel 1956, due giovani fisici cinesi che lavoravano negli Stati Uniti, Tsung Dao Lee e Chen Ning Yang, avanzarono esattamente questa ipotesi: essi proposero che la conservazione della parità fosse valida per le interazioni forti, ma potesse venir meno nelle interazioni deboli, come quelle coinvolte nel decadimento del mesone K.

Mentre analizzavano matematicamente questa possibilità, parve loro chiaro che, nel caso in cui la conservazione della parità fosse venuta meno, le particelle implicate nelle interazioni deboli avrebbero dovuto avere "chiralità", cioè presentare una simmetria speculare come quella delle mani, un'idea già avanzata nel 1927 dal fisico ungherese Eugene Wigner. Spieghiamoci meglio.

La mano destra e quella sinistra sono speculari, cioè possono essere considerate come immagini speculari l'una dell'altra; riflessa in uno specchio la mano destra sembra la sinistra. Se le mani fossero completamente simmetriche, l'immagine riflessa non sarebbe diversa dall'immagine diretta, e non esisterebbe per principio la distinzione tra «mano sinistra» e «mano destra». Bene; ora, applichiamo questo principio a un gruppo di particelle che emettano elettroni. Se gli elettroni sono emessi in ugual numero in tutte le direzioni, la particella in questione non ha chiralità; ma se la maggior parte degli elettroni tende ad andare in una direzione preferenziale - diciamo verso l'alto anziché verso il basso - la particella non è simmetrica.

La particella presenta allora una chiralità: se guardiamo l'emissione in uno specchio, la direzione preferenziale sarà invertita. Pertanto, l'unica cosa da fare era osservare un insieme di particelle che emettono elettroni in un'interazione debole (qualche particella, per esempio, che decadesse emettendo particelle beta) e controllare se gli elettroni uscivano preferenzialmente in una direzione. Lee e Yang chiesero a un fisico sperimentale della Columbia University, la signora Chien-Shiung Wu, di effettuare l'esperimento.

Costei predispose le condizioni sperimentali necessarie: tutti gli atomi che emettevano gli elettroni dovevano essere orientati in una stessa direzione, perché fosse possibile vedere se la direzione di emissione era uniforme; ciò fu ottenuto ricorrendo a un campo magnetico e mantenendo il materiale a una temperatura prossima allo zero assoluto.

Nel giro di 48 ore l'esperimento diede la risposta attesa: gli elettroni venivano effettivamente emessi in modo asimmetrico. La conservazione della parità era violata nelle interazioni deboli. Il "mesone theta" e il "mesone tau" erano un'unica particella, che talora decadeva con parità pari, talora con parità dispari. Altri esperimenti confermarono ben presto la violazione della parità; per la loro audace intuizione, i fisici teorici Lee e Yang ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1957.

Se la simmetria viene rotta nel caso delle interazioni deboli, forse viene meno anche in altri casi. Dopo tutto, potrebbe darsi che l'universo fosse globalmente sinistrorso (oppure destrorso). Oppure, gli universi potrebbero essere due, uno sinistrorso, l'altro destrorso, uno fatto di materia, l'altro di antimateria.

Oggi i fisici considerano le leggi di conservazione in generale con un certo scetticismo; ciascuna di esse potrebbe risultare valida in certe condizioni e non in altre, come si è scoperto per la conservazione della parità.

Dopo la scoperta della sua violazione, la parità fu combinata con la "coniugazione di carica", un'altra proprietà matematica assegnata alle particelle subatomiche, da cui dipendeva il loro status di particella o di antiparticella: l'insieme delle due leggi di conservazione era indicato come "simmetria C.P.", e costituiva una legge più generale e più basilare sia di quella di conservazione della parità ("P") sia di quella di conservazione della coniugazione di carica ("C"). (Esistono altri casi analoghi; come vedremo nel prossimo capitolo, la legge di conservazione della massa ha ceduto il passo alla più generale e più profonda legge di "conservazione della massa-energia".)

Eppure, anche la simmetria C.P. si è dimostrata inadeguata: nel 1964, due fisici americani, Val Logsden Fitch e James Watson Cronin, dimostrarono che anche la simmetria C.P. veniva, in rare occasioni, violata nelle interazioni deboli. Si dovette perciò introdurre anche la questione della direzione del tempo (T): oggi si parla infatti di "simmetria C.P.T.". Per i loro contributi Fitch e Cronin condivisero il premio Nobel per la fisica del 1980.

UNA TEORIA UNITARIA DEI CAMPI.

Perché dovrebbero esistere quattro campi diversi, quattro modi diversi in cui possono interagire le particelle? Naturalmente potrebbe esserci un numero qualsiasi di campi, ma l'esigenza della semplicità è profondamente radicata nella mentalità scientifica. Se esistono quattro campi (o un numero qualsiasi) non potrebbe darsi che essi fossero aspetti differenti di un unico campo, di un'unica interazione? In tal caso, il miglior modo di dimostrarlo sarebbe quello di trovare una relazione matematica capace di descriverli tutti, che illuminasse anche qualche aspetto delle loro proprietà che altrimenti rimarrebbe oscuro. Per esempio, più di un secolo fa, Maxwell trovò un insieme di equazioni matematiche che descrivono il comportamento sia dell'elettricità sia del magnetismo, dimostrando che questi non erano che due aspetti di un unico fenomeno, che oggi chiamiamo "campo elettromagnetico". Non potremmo proseguire in questa direzione?

Einstein cominciò a lavorare su una "teoria unitaria dei campi" in un'epoca in cui si conoscevano soltanto i campi elettromagnetico e gravitazionale; egli dedicò a questa impresa diversi decenni, e fallì; mentre vi era impegnato, furono scoperti altri due campi, quelli a breve raggio, il che rendeva ancora più difficile l'impresa.

Verso la fine degli anni sessanta, tuttavia, il fisico americano Steven Weinberg e il fisico anglo-pakistano Abdus Salam, lavorando indipendentemente, idearono un modello matematico che descriveva unitariamente il campo elettromagnetico e quello debole, i quali venivano riuniti sotto l'unica denominazione di "campo elettrodebole".

Questo modello matematico fu poi ulteriormente elaborato dal fisico americano Sheldon Lee Glashow, che era stato compagno di studi di Weinberg alle scuole superiori. La teoria imponeva che i campi sia elettromagnetico che debole presentassero delle "correnti neutre", cioè delle interazioni tra particelle in cui non vengono scambiate cariche elettriche. Quando si andò alla loro ricerca, si trovò che alcune di queste, in precedenza sconosciute, esistevano davvero, esattamente secondo le previsioni - una solida conferma della nuova teoria. Weinberg, Salam e Glashow condivisero il premio Nobel per la fisica nel 1979.

La teoria elettrodebole forniva particolari sulla natura delle particelle di scambio dell'interazione debole (particelle che erano state cercate invano per mezzo secolo). Avrebbero dovuto essere non una sola particella W, ma tre particelle: una W (con esponente) +, una W (con esponente) meno e un'altra chiamata Z (con esponente) 0; in altre parole, una particella positiva, una negativa e una neutra.

Inoltre, si potevano specificare alcune loro proprietà; se la teoria elettrodebole era corretta, per esempio, la loro massa avrebbe dovuto essere 80 volte quella del protone - fatto che spiegava bene la loro inafferrabilità. Ci vollero energie enormi per produrle e renderle osservabili. Fra l'altro, masse così grandi facevano diventare molto breve il raggio d'azione dell'interazione debole, il che rendeva poco probabile che due particelle si avvicinassero tra loro abbastanza perché l'interazione avvenisse, e ciò spiegava come mai l'interazione debole fosse tanto meno intensa dell'interazione forte.

Nel 1983 i fisici avevano ormai a disposizione energie sufficientemente elevate per affrontare l'impresa, e le tre particelle furono finalmente osservate - e risultò anche che avevano proprio la massa prevista. Questo confermava saldamente la teoria elettrodebole.

Nel frattempo, lo stesso schema matematico che sembrava descrivere sia il campo elettromagnetico che il campo debole parve a molti fisici in grado (con qualche modificazione) di render conto anche dell'interazione forte. Sono state proposte diverse vie per raggiungere questo scopo. Se la teoria elettrodebole è una teoria unitaria, una che riuscisse a includere anche il campo forte, sarebbe una "teoria di grande unificazione" (in inglese "grand unified theory", dalle cui iniziali l'abbreviazione "GUTs", al plurale perché ne esistono varie versioni).

Perché sia possibile includere nella descrizione delle GUTs l'interazione forte, sembra che dovrebbero esistere, oltre ai gluoni, particelle di scambio di enorme massa in numero non inferiore a dodici. Dovendo avere massa maggiore di quella delle particelle W e Z, esse sarebbero più difficili da osservare; anzi, per il momento, non c'è alcuna speranza di riuscirci. Inoltre, tali

particelle dovrebbero avere un raggio d'azione molto minore di tutto ciò che fino a oggi è stato considerato, dell'ordine di un quadrilionesimo del diametro del nucleo atomico.

Ora, se queste particelle di scambio di massa elevatissima esistessero davvero, una di loro potrebbe passare da un quark a un altro, entro un protone, distruggendo durante tale passaggio uno dei quark e convertendolo in un leptone; il protone, avendo perso uno dei quark, diventerebbe un mesone, che finirebbe per decadere in un positrone.

Tuttavia, perché possa avvenire lo scambio, i quark (che sono particelle puntiformi) dovrebbero passare così vicini l'uno all'altro da trovarsi entro il raggio d'azione di queste particelle di scambio di grande massa. Ma tale raggio è talmente piccolo che, nemmeno entro il ridottissimo volume di un protone, un tale avvicinamento è probabile.

In effetti, si è calcolato che l'avvicinamento necessario si verificherebbe così raramente che un protone verrebbe in media distrutto solo dopo 10 alla 31 anni di esistenza, cioè dopo un numero di anni che è 600 milioni di trilioni di volte la durata totale dell'universo fino a oggi.

Naturalmente, si tratta di un valore "medio": alcuni protoni potranno vivere anche molto più a lungo, ma altri per un periodo assai più corto. Se si potesse tenere sotto osservazione un numero abbastanza grande di protoni, in realtà si troverebbe che in ogni secondo avvengono parecchie disintegrazioni di protoni; per esempio, potrebbero verificarsi tre miliardi di disintegrazioni di protoni al secondo negli oceani della terra. (Sembrerebbe un numero enorme; invece è, naturalmente, una quantità del tutto insignificante, rispetto al numero totale dei protoni contenuti nell'oceano.) I fisici sono estremamente interessati alla possibilità di osservare queste disintegrazioni, distinguendole da altri eventi simili che potrebbero verificarsi in numero assai maggiore. Se si potesse rivelare questa disintegrazione, essa sarebbe una importante prova a favore delle GUTs; ma, come nel caso delle onde gravitazionali, si tratta di un'impresa al limite del possibile, e può darsi che ci voglia molto tempo per risolvere la questione in un senso o nell'altro.

Si possono applicare le teorie emerse in questi recenti tentativi di unificazione a uno studio particolareggiato del big bang, con cui l'universo ha avuto inizio. Sembrerebbe che al momento iniziale, quando l'universo esisteva da meno di 1 milionesimo di trilionesimo di trilionesimo di trilionesimo di secondo, ed era molto più piccolo di un protone, e aveva una temperatura dell'ordine dei trilioni di trilioni di trilioni di gradi, ci fosse un solo campo e un solo tipo di interazione tra particelle. Via via che l'universo si espandeva e la temperatura diminuiva, si sarebbero poi separati i diversi campi.

Analogamente, possiamo immaginare che la terra, quando era estremamente calda, fosse soltanto una sfera gassosa, nella quale tutti i diversi tipi di atomi erano mescolati uniformemente, così che ogni porzione del gas aveva le stesse proprietà di tutte le altre.

Quando però il gas incominciò a raffreddarsi, le diverse sostanze si separarono sotto forma prima di liquidi, poi di solidi; alla fine rimase una sfera formata di molte sostanze diverse, separate l'una dall'altra.

Fino a oggi, però, l'interazione gravitazionale si è dimostrata inesorabilmente decisa a non lasciarsi includere nel tipo di descrizione matematica elaborato da Weinberg e dagli altri. L'unificazione che aveva sconfitto Einstein ha dunque sconfitto anche i suoi successori, almeno fino a oggi.

Ciononostante, le GUTs hanno prodotto qualcosa di estremamente interessante: i fisici si erano chiesti come avesse fatto il big bang a produrre un universo così disomogeneo da contenere stelle e galassie; perché mai la materia non si era semplicemente diffusa in tutte le direzioni, formando un vasto alone uniforme di gas e di polvere? E inoltre, perché la densità dell'universo è tale da non consentirci di decidere con sicurezza se esso è aperto o chiuso? Avrebbe potuto essere decisamente aperto (a curvatura negativa) o decisamente chiuso (a curvatura positiva), e invece è pressoché piatto.

Un fisico americano, Alan Guth, negli anni settanta ha usato le GUTs per sostenere che, al momento del big bang, si è verificato un periodo iniziale di espansione estremamente rapida o

«inflazione». In questo "universo inflattivo" la temperatura sarebbe caduta così rapidamente da non lasciare il tempo necessario perché si separassero i diversi campi o si formassero le diverse particelle. Solo più tardi, quando l'universo era ormai abbastanza grande, sarebbe avvenuta la differenziazione; questa è la ragione per cui l'universo è piatto e anche la ragione della disomogenea distribuzione della materia. Il fatto che una teoria di grande unificazione, elaborata avendo in mente le sole particelle, abbia potuto risolvere due enigmi sulla nascita dell'universo, è una forte prova a favore della sua validità.

Naturalmente, l'universo inflattivo non elimina tutti i problemi; vari fisici hanno cercato di mettere insieme le cose in modo diverso, con la speranza di una maggior convergenza tra previsioni e realtà. Ma siamo solo agli inizi, e vi sono buone speranze che qualche tipo di teoria di grande unificazione e di teoria dell'inflazione funzioni. Forse si arriverà al successo quando qualcuno troverà finalmente il modo di far rientrare l'interazione gravitazionale nella teoria, e l'unificazione sarà completa.

Capitolo 8.
LE ONDE.

LA LUCE.

Fin qui mi sono occupato quasi esclusivamente di oggetti materiali - da quelli grandissimi, come le galassie, a quelli piccolissimi, come gli elettroni. Esistono però anche alcuni importanti oggetti immateriali, tra i quali il più noto e il più variamente celebrato è la luce. Secondo la Bibbia le prime parole del Creatore furono: «Sia fatta la luce», e il sole e la luna furono creati primariamente per fungere da sorgenti di luce: «Che siano i luminari nel firmamento per recare la luce sulla terra».

Gli studiosi dell'antichità e del Medioevo erano completamente all'oscuro della natura della luce; essi congetturarono che fosse fatta di particelle emesse dagli oggetti luminosi o forse dallo stesso occhio. Gli unici fatti che riuscirono a stabilire al proposito furono che la luce si propagava in linea retta, che veniva riflessa da uno specchio secondo un angolo uguale a quello di incidenza e che cambiava direzione quando dall'aria passava nel vetro, o nell'acqua, o in qualche altra sostanza trasparente ("rifrazione").

LA NATURA DELLA LUCE.

Quando la luce entra obliquamente - formando cioè un angolo con la perpendicolare alla superficie - nel vetro o in un'altra sostanza trasparente, essa viene sempre rifratta in una direzione che forma con la perpendicolare un angolo inferiore a quello d'incidenza. La relazione esatta fra l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione fu stabilita nel 1621 dal fisico olandese Willebrord Snell; il quale tuttavia non rese pubblica la sua scoperta; il filosofo francese Cartesio riscoprì indipendentemente la legge nel 1637.

I primi esperimenti importanti sulla natura della luce vennero condotti da Isaac Newton nel 1666, come già ho avuto occasione di dire nel capitolo secondo. Newton fece in modo che un raggio di luce, che entrava in una stanza buia da una fessura praticata negli scuri, incidesse obliquamente su una faccia di un prisma triangolare di vetro: il raggio veniva rifratto una prima volta quando penetrava nel vetro, e una seconda volta, nella stessa direzione, quando ne usciva da un'altra faccia del prisma. (Le due rifrazioni nella stessa direzione erano dovute al fatto che le due

facce del prisma formavano un angolo; in una normale lastra di vetro, invece, le facce sarebbero parallele.) Newton fece in modo che il raggio che emergeva dal prisma colpisse uno schermo bianco, per poter osservare gli effetti della rifrazione ripetuta, e trovò che, anziché formare una macchia di luce bianca, il raggio si allargava formando una striscia di vari colori - nell'ordine: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro e viola.

Newton ne dedusse che la luce bianca ordinaria è una miscela di tipi differenti di luce, i quali, separatamente, agiscono sui nostri occhi in modo da suscitare la sensazione dei diversi colori. Questa striscia di colori, anche se ci appare abbastanza reale, è immateriale, proprio come un fantasma; non per nulla Newton la denominò "spettro".

Newton stabilì che la luce doveva essere costituita di particelle minuscole ("corpuscoli") che viaggiavano a velocità enorme, il che avrebbe spiegato la ragione per cui si propagava in linea retta e produceva delle ombre nette. La luce viene riflessa da uno specchio perché le particelle rimbalzano dopo aver colpito la superficie, e viene deviata quando penetra in un mezzo rifrangente (come l'acqua o il vetro), perché le particelle in tale mezzo viaggiano più velocemente che nell'aria.

Restavano però ancora varie domande imbarazzanti. Per esempio, perché le particelle di luce verde venivano rifratte più di quelle di luce gialla? Come mai due fasci di luce possono incrociarsi senza esercitare alcuna azione l'uno sull'altro - come, cioè, se le particelle non entrassero in collisione?

Nel 1678, il fisico olandese Christiaan Huygens (un versatile scienziato, che aveva costruito il primo orologio a pendolo e svolto importanti ricerche di carattere astronomico) avanzò una teoria alternativa, secondo la quale la luce consisteva di piccolissime onde.

Con tale ipotesi non sarebbe difficile spiegare la diversa rifrazione subita dai vari tipi di luce che attraversano un mezzo rifrangente, purché si assuma che la luce viaggi più lentamente in tale mezzo che nell'aria; l'entità della rifrazione varierebbe con la lunghezza delle onde: minore la lunghezza d'onda, maggiore la rifrazione. Per questa ragione la luce viola (quella che subisce una maggior rifrazione) avrebbe una lunghezza d'onda minore di quella della luce azzurra, la quale, a sua volta, avrebbe lunghezza d'onda minore di quella della luce verde, e così via. È la differenza di lunghezza d'onda, sosteneva Huygens, che fa sì che l'occhio distingua i vari colori.

Inoltre, naturalmente, se la luce è fatta di onde, due fasci possono incrociarsi senza disturbarsi. (Dopo tutto anche le onde sonore e le onde che si formano nell'acqua si incrociano senza perdere la propria identità.)

Ma neppure la teoria ondulatoria di Huygens era del tutto soddisfacente: per esempio, non spiegava perché i raggi luminosi si propaghino in linea retta e producano ombre dai contorni netti, né come mai le onde luminose non aggirino gli ostacoli, come fanno invece le onde sonore e quelle che si formano nell'acqua. Per di più, se la luce è fatta di onde, come fa a propagarsi nel vuoto, cosa che sembrava facesse senz'ombra di dubbio, dal momento che arrivava dal sole e dalle stelle, attraversando lo spazio? Quale mezzo la trasmetteva?

Per un secolo circa le due teorie restarono in competizione: quella di Newton, la "teoria corpuscolare", era di gran lunga più diffusa sia perché appariva in complesso la più logica, sia in virtù della fama del grande Newton. Tuttavia nel 1801 un medico e fisico inglese, Thomas Young, effettuò un esperimento che fece pendere la bilancia dalla parte opposta. Egli fece passare un sottile raggio di luce attraverso due fori situati a pochissima distanza, dietro ai quali aveva collocato uno schermo. Se la luce fosse stata costituita di particelle, era presumibile che i due raggi che uscivano dai fori avrebbero semplicemente prodotto sullo schermo una regione più luminosa dove si sovrapponevano e altre meno luminose dove non si sovrapponevano. Ma non fu questo ciò che Young osservò: lo schermo presentava una serie di frange luminose, ciascuna separata da quella contigua da una frangia scura. Sembrava dunque che in questi intervalli scuri la luce dei due raggi, sommandosi, desse come risultato il buio!

La teoria ondulatoria poteva spiegare facilmente questo effetto: la frangia luminosa corrispondeva a punti in cui le onde di un raggio erano rafforzate da quelle dell'altro; in altri

termini, le due serie di onde erano "in fase", cioè i loro massimi coincidevano, rinforzandosi a vicenda. Le frange scure, invece, corrispondevano a zone in cui le onde erano "fuori fase", cioè il minimo dell'una annullava il massimo dell'altra; in queste zone le onde, anziché rinforzarsi a vicenda, interferivano l'una con l'altra, dando come energia luminosa totale zero.

In base all'ampiezza delle frange e alla distanza tra i due fori da cui emergevano i raggi luminosi, fu possibile calcolare la lunghezza delle onde luminose - per esempio, della luce rossa o violetta o di un colore intermedio: e si trovò che tali lunghezze d'onda erano veramente molto brevi. Per esempio, la lunghezza d'onda della luce rossa risultò essere di 0,000075 centimetri. (In seguito le lunghezze d'onda della luce vennero espresse in un'unità più comoda suggerita da Angstrom, e che da lui prese il nome: l'"angstrom" - abbreviazione Å - è un centomilionesimo di centimetro. Quindi, la lunghezza d'onda della luce rossa, a un estremo dello spettro, è di circa 7500 unità angstrom; quella della luce viola, all'altro estremo dello spettro, è di circa 3900 unità angstrom; e le lunghezze d'onda corrispondenti ai vari colori della porzione visibile dello spettro sono comprese tra questi due valori.)

Il fatto che le lunghezze d'onda abbiano valori così piccoli ha una grande importanza. La ragione per cui le onde luminose viaggiano in linea retta e proiettano ombre nette è che le loro dimensioni sono incomparabilmente minori di quelle degli oggetti ordinari; le onde possono aggirare un ostacolo soltanto quando quest'ultimo non è molto più grande della lunghezza d'onda. Perfino i batteri, per fare un esempio, sono molto più grandi della lunghezza di un'onda luminosa, ed è per questo che la luce può darne un'immagine ben definita al microscopio; solo gli oggetti di dimensioni prossime a quelle della lunghezza d'onda (per esempio, i virus e altre particelle submicroscopiche) sono abbastanza piccoli da essere aggirati dalle onde luminose.

Fu il fisico francese Augustin Jean Fresnel a mostrare, nel 1818, che un'onda luminosa aggira veramente un oggetto, se questo è sufficientemente piccolo. In questo caso, la luce produce quella che viene chiamata figura di "diffrazione": per esempio, le linee parallele estremamente sottili di un "reticolo di diffrazione" agiscono come una serie di minuscoli ostacoli che si rinforzano a vicenda, e, dato che l'entità della diffrazione dipende dalla lunghezza d'onda, viene prodotto uno spettro. Anche qui è possibile calcolare, in base alla diversa diffrazione di ogni singolo colore o di ogni singola porzione dello spettro e in base alla distanza, nota, delle righe del reticolo tracciato sul vetro, la lunghezza d'onda.

Fraunhofer fu un pioniere nell'uso dei reticoli di diffrazione, un contributo che viene facilmente dimenticato di fronte alla sua scoperta, più famosa, delle righe spettrali. Il fisico americano Henry Augustus Rowland inventò i reticoli concavi e sviluppò delle tecniche per tracciarvi fino a 8000 righe per centimetro. Fu merito suo se si poté soppiantare il prisma nella spettroscopia.

Questi risultati sperimentali, uniti al fatto che Fresnel aveva sviluppato sistematicamente la descrizione matematica del moto ondulatorio, fecero ritenere assodata la teoria ondulatoria della luce e liquidata quella corpuscolare - apparentemente per sempre.

Non solo si accettò l'esistenza delle onde luminose, ma si calcolarono anche le loro lunghezze con precisione sempre maggiore; nel 1827, il fisico francese Jacques Babinet proponeva di adottare la lunghezza d'onda della luce - una grandezza fisica inalterabile - come lunghezza campione, da sostituirsi ai vari campioni arbitrari che allora erano in uso. Tuttavia, la sua proposta non divenne realizzabile che negli anni successivi al 1880, quando il fisico tedesco-americano Albert Abraham Michelson inventò uno strumento chiamato "interferometro", capace di misurare le lunghezze d'onda della luce con precisione senza precedenti: nel 1893, Michelson misurò la lunghezza d'onda della riga rossa dello spettro del cadmio, trovando il valore di 1 su 1553164 metri.

Sollevò qualche perplessità la scoperta che gli elementi sono costituiti da isotopi differenti, a ciascuno dei quali corrisponde una riga di lunghezza d'onda leggermente diversa; nel corso del nostro secolo, tuttavia, vennero misurate le righe dei singoli isotopi; negli anni trenta furono

misurate quelle del cripto 86, che, essendo un gas, poteva essere trattato a basse temperature, alle quali il moto degli atomi è rallentato, il che consente di ottenere righe più sottili.

Nel 1960, la riga del cripto 86 venne adottata dalla Conferenza generale di pesi e misure come campione fondamentale di lunghezza; in seguito a ciò il metro è stato ridefinito come uguale a 1650763,73 volte la lunghezza d'onda di tale riga spettrale. Grazie a questo campione, la precisione delle misure di lunghezza è aumentata di mille volte. Il vecchio metro campione, costituito da una barra di platino-iridio, poteva essere misurato, nella migliore delle ipotesi, con l'approssimazione di una parte su un milione, mentre per l'onda luminosa l'incertezza non supera una parte su un miliardo.

LA VELOCITÀ DELLA LUCE.

Ovviamente, la luce viaggia a velocità straordinaria: se girate l'interruttore, piombate immediatamente nel buio, nell'attimo stesso in cui effettuate il gesto. Il suono non è altrettanto veloce: se guardate da una certa distanza un uomo che taglia la legna, udite il colpo solo qualche istante dopo aver visto abbattersi l'ascia; evidentemente, il suono ha impiegato qualche istante per raggiungere l'orecchio. In effetti, è facile misurarne la velocità: 332 metri al secondo, nell'aria al livello del mare.

Galileo fu il primo a cercare di misurare la velocità della luce; stando su un'altura mentre un suo assistente stava su un'altra, Galileo scopriva una lanterna e l'assistente, non appena ne scorgeva il lampo, segnalava la cosa scoprendo a sua volta un'altra lanterna. Galileo effettuò quest'esperimento a distanze sempre maggiori, presumendo che il tempo necessario all'assistente per dare la sua risposta restasse sempre uguale, così che ogni aumento dell'intervallo di tempo tra il momento in cui egli scopriva la sua lanterna e quello in cui vedeva la risposta avrebbe rappresentato il tempo impiegato dalla luce a coprire la distanza in più. L'idea era buona, ma la luce è di gran lunga troppo veloce perché con un metodo così rudimentale si possa registrare una differenza.

Nel 1676, l'astronomo danese Olaus Roemer riuscì invece a misurare la velocità della luce - ma ricorrendo alle distanze astronomiche; studiando le eclissi dei quattro satelliti di Giove (eclissi prodotte dal pianeta stesso), Roemer notò che gli intervalli tra eclissi successive diventavano più lunghi quando la terra si allontanava da Giove e più brevi quando gli si avvicinava. Era presumibile che la differenza nei periodi delle eclissi riflettesse la differenza delle distanze tra la terra e Giove, cioè che fosse una misura dei diversi tempi impiegati dalla luce per percorrere la distanza da Giove alla terra. In base a una stima approssimativa delle dimensioni dell'orbita terrestre e alla massima discrepanza tra i periodi delle eclissi, che Roemer considerò come il tempo impiegato dalla luce per attraversare in tutta la sua ampiezza l'orbita terrestre, egli calcolò la velocità della luce: la sua stima fu di 212 mila chilometri al secondo, valore notevolmente prossimo alla velocità reale per quello che può essere considerato un primo tentativo, e anche sufficientemente elevato per suscitare l'incredulità dei suoi contemporanei.

I risultati di Roemer vennero però confermati mezzo secolo dopo in base a considerazioni del tutto diverse. Nel 1728, l'astronomo inglese James Bradley scoprì che le stelle sembravano cambiare posizione a causa del moto della terra - non per via della parallasse, ma perché la velocità del moto della terra intorno al sole costituisce una frazione misurabile, benché piccola, della velocità della luce. Di solito per illustrare questo concetto si ricorre all'analogia di un uomo che cammina sotto un ombrello durante un temporale: anche se le gocce cadono verticalmente, l'uomo deve inclinare l'ombrello in avanti, perché si sta spostando rispetto alle gocce; più svelto cammina, più deve inclinare l'ombrello. Analogamente, la terra si muove rispetto ai raggi luminosi che provengono dalle stelle, e l'astronomo deve inclinare un pochino il telescopio, e in direzioni diverse, via via che la terra muta la sua direzione di moto.

Dall'entità dell'inclinazione (l'"aberrazione della luce"), Bradley poté stimare il valore della velocità della luce, che risultò pari a 283 mila chilometri al secondo - un valore più elevato, e anche più esatto, di quello di Roemer, benché ancora troppo basso del 5,5 per cento circa.

Infine gli scienziati ottennero misurazioni ancora più precise, perfezionando l'idea originale di Galileo. Nel 1849, il fisico francese Armand Hippolyte Louis Fizeau ideò un dispositivo nel quale un lampo di luce veniva inviato su uno specchio situato a 8 chilometri di distanza; lo specchio lo rifletteva fino all'osservatore: il tempo trascorso per percorrere i 16 chilometri non superava di molto 1 su 20 mila di secondo, ma Fizeau riuscì a misurarlo ponendo sul percorso del raggio luminoso una ruota dentata in rapida rotazione; quando la ruota girava a una data velocità, il lampo, passato tra un dente e l'altro all'andata, colpiva il dente successivo al ritorno; quindi Fizeau, situato dietro alla ruota, non lo vedeva. Se poi si aumentava la velocità di rotazione della ruota, il raggio sulla via del ritorno non veniva più bloccato, ma passava nel successivo intervallo tra un dente e l'altro. Così, regolando e misurando la velocità di rotazione della ruota, Fizeau riuscì a calcolare il tempo trascorso, e quindi la velocità con cui viaggiava il lampo luminoso; egli trovò che questa era di 315 mila chilometri al secondo, un valore troppo alto del 5,2 per cento.

Un anno dopo, Jean Foucault (che poco tempo più tardi avrebbe effettuato il famoso esperimento del pendolo, che abbiamo descritto nel capitolo quarto) perfezionò il metodo usando uno specchio rotante al posto della ruota dentata. Ora il tempo trascorso veniva misurato da un leggero cambiamento della direzione in cui veniva riflesso il raggio di luce da parte dello specchio in rapida rotazione. La migliore misurazione ottenuta da Foucault nel 1862 fornì, come velocità della luce nell'aria, 298 mila chilometri al secondo - un valore troppo basso solo dello 0,7 per cento. In più, Foucault usò il suo metodo per determinare la velocità della luce in vari liquidi e trovò che essa era considerevolmente inferiore alla velocità della luce nell'aria. Anche questo risultato confortava la teoria ondulatoria di Huygens.

Una precisione ancora maggiore nella misurazione della velocità della luce fu resa possibile dall'opera di Michelson, il quale - per più di quarant'anni, a partire dal 1879 - applicò il metodo di Fizeau e Foucault, perfezionandolo progressivamente. Michelson, alla fine, fece passare la luce attraverso il vuoto anziché attraverso l'aria (anche l'aria, infatti, rallenta leggermente la luce): a questo scopo egli usò tubi d'acciaio lunghi oltre un chilometro e mezzo in cui veniva fatto il vuoto. In tal modo stabilì che la velocità della luce nel vuoto era pari a 299774 chilometri al secondo - un valore troppo basso solo dello 0,006 per cento. Egli dimostrò inoltre che le onde luminose di qualsiasi lunghezza viaggiano nel vuoto con la stessa velocità.

Nel 1972, un'équipe di ricerca diretta da Kenneth M. Evenson effettuò delle misurazioni ancora più precise, trovando una velocità di 299792,4494 chilometri al secondo; una volta che tale velocità fu nota con una precisione così stupefacente, divenne possibile usare la luce per misurare le lunghezze. (Tuttavia ciò era conveniente anche quando si conosceva la velocità della luce con minor precisione.)

IL RADAR.

Immaginate un breve impulso luminoso che si propaghi in avanti, incontri un ostacolo, venga riflesso all'indietro e sia captato nel punto da cui era partito un istante prima: questa è l'idea base del radar. Ciò che occorre è un'onda con una frequenza abbastanza bassa da consentirle di penetrare attraverso la nebbia e le nuvole, ma abbastanza alta da far sì che sia riflessa efficientemente; è risultato che l'intervallo di frequenza ideale si trova nella regione delle microonde, con lunghezze d'onda comprese tra 0,5 e 100 centimetri. In base al tempo trascorso tra l'emissione dell'impulso e l'arrivo dell'eco, è possibile stimare la distanza dell'oggetto riflettente.

Numerosi fisici lavorarono ad apparecchiature basate su questo principio, ma il fisico scozzese Robert Alexander Watson-Watt fu il primo a rendere tale sistema effettivamente operativo. Nel 1935 era ormai possibile, per merito suo, seguire il volo di un aereo basandosi sulla

riflessione delle microonde che esso rinviava. Tale sistema venne definito in inglese "radio detection and ranging" (localizzazione e misurazione delle distanze mediante onde radio), abbreviato in "ra.d.a.r.", ossia "radar". (Il termine radar è dunque uno dei tanti acronimi diventati così comuni nella terminologia scientifica e tecnologica del mondo moderno.)

Il mondo venne a conoscenza dei radar quando fu reso noto che essi avevano consentito agli inglesi di avvistare gli aerei nazisti durante la Battaglia d'Inghilterra, nonostante la nebbia e l'oscurità notturna. Va quindi al radar, almeno in parte, il merito della vittoria inglese.

Dopo la seconda guerra mondiale, il radar ha avuto numerose applicazioni pacifiche: è stato usato per segnalare gli uragani e ha quindi dato un valido aiuto ai meteorologi; oggi esso è anche usato per studiare le migrazioni degli uccelli, da quando si è compreso che certi misteriosi echi radar, detti «angeli», non erano causati da messaggeri celesti, ma da stormi, appunto, di uccelli.

Inoltre, come ho spiegato nel capitolo terzo, sono state proprio le onde radar riflesse da Venere e Mercurio a fornire agli astronomi nuove informazioni sulla rotazione di quei pianeti e sulla natura della superficie di Venere.

LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE LUMINOSE ATTRAVERSO LO SPAZIO.

Mentre si accumulavano le prove a favore della natura ondulatoria della luce, gli scienziati seguitavano a essere assillati da una domanda inquietante: come può la luce propagarsi nel vuoto? Altri tipi di onde - per esempio, quelle sonore - richiedono un mezzo materiale.

Noi ricaviamo la sensazione del suono proprio dalle vibrazioni degli atomi o delle molecole del mezzo in cui esso viaggia. (Dal nostro punto di osservazione, qui sulla terra, non potremmo mai udire un'esplosione, comunque fragorosa, che avvenisse sulla luna o in qualsiasi altro luogo dello spazio, perché le onde sonore non possono viaggiare nel vuoto.) Eppure i fatti erano chiari: le onde luminose viaggiavano attraverso il vuoto ancora più facilmente che attraverso la materia, raggiungendoci da galassie lontane miliardi di anni luce, anche se nello spazio non c'era nulla che potesse vibrare.

La fisica classica si è sempre trovata a disagio di fronte al concetto di «azione a distanza». Newton, per esempio, si domandava come facesse la forza di gravità ad agire attraverso lo spazio; come spiegazione possibile, egli aveva riesumato il concetto degli antichi greci di un etere che riempisse i cieli, e aveva congetturato che la forza di gravità potesse in qualche modo essere trasmessa dall'etere. Newton non ebbe bisogno di porsi lo stesso problema a proposito della luce, dato che supponeva che essa fosse composta di particelle dotate di moto veloce; ma tale idea si rivelò errata con la scoperta della natura ondulatoria della luce.

Nel tentativo di spiegare la propagazione delle onde luminose attraverso lo spazio, i fisici conclusero che anche la luce doveva essere trasmessa dall'ipotetico etere, e cominciarono a parlare di "etere luminifero". Quest'idea, però, incontrò subito delle serie difficoltà. Le onde luminose sono onde "trasversali", cioè vibrano ad angolo retto rispetto alla direzione di propagazione, come le increspature sulla superficie dell'acqua; diverso è il caso delle onde sonore, che sono "longitudinali", e cioè vibrano nella stessa direzione in cui si propagano; ora, la teoria fisica diceva che solo un mezzo "solido" poteva trasmettere le onde trasversali. (Il caso delle onde trasversali che viaggiano "sulla superficie" dell'acqua è un caso speciale - esse, comunque, non possono penetrare in profondità nel liquido.) Pertanto l'etere avrebbe dovuto essere solido, non gassoso né liquido - anzi, addirittura un solido molto rigido. Per poter trasmettere onde alla fantastica velocità della luce, esso avrebbe dovuto essere molto più rigido dell'acciaio. Inoltre, questo rigido etere avrebbe dovuto permeare la materia ordinaria - non soltanto il vuoto dello spazio, ma anche i gas, l'acqua, il vetro e tutte le altre sostanze trasparenti che la luce può attraversare. E, come se ciò non bastasse, questo materiale solido, super-rigido avrebbe dovuto essere talmente privo di attrito, talmente cedevole, da non interferire minimamente con il moto del più piccolo asteroide o con un battito di ciglia!

Nonostante tutte queste difficoltà, l'introduzione del concetto di etere appariva utile. Faraday, che era del tutto privo d'istruzione matematica, ma era dotato di un'intuizione meravigliosa, escogitò il concetto delle "linee di forza", che visualizzò come distorsioni elastiche dell'etere; così il concetto di etere gli servì anche a spiegare i fenomeni magnetici.

Negli anni successivi al 1860 Clerk Maxwell, un grande ammiratore di Faraday, si impegnò in un'analisi matematica che rendesse conto delle linee di forza. Egli elaborò un insieme di quattro semplici equazioni che complessivamente descrivevano pressoché tutti i fenomeni riguardanti l'elettricità e il magnetismo. Tali equazioni, pubblicate nel 1864, non solo descrivevano le interrelazioni tra i fenomeni elettrici e magnetici, ma mostravano anche che essi non potevano essere separati. Dove esiste un campo elettrico, deve esserci anche un campo magnetico che forma un angolo retto con il primo, e viceversa.

In realtà, si tratta di un unico campo, il campo elettromagnetico. (Questa fu la prima teoria unitaria dei campi, e ispirò tutto il lavoro svolto nella stessa direzione durante il secolo successivo.)

Considerando le implicazioni delle sue equazioni, Maxwell comprese che un campo elettrico variabile deve indurre un campo magnetico variabile, e questo, a sua volta, deve indurre un campo elettrico variabile, e così via: i due campi «si rincorrono» come se giocassero alla cavallina, e così si propagano verso l'esterno in tutte le direzioni. Il risultato è una radiazione che presenta le proprietà di un'onda. In breve, Maxwell previde l'esistenza di una "radiazione elettromagnetica", la cui frequenza corrisponde a quella delle oscillazioni del campo elettromagnetico.

Maxwell riuscì anche a calcolare la velocità con cui un'onda elettromagnetica avrebbe dovuto propagarsi, prendendo in considerazione il rapporto tra certe costanti corrispondenti nelle equazioni che descrivono la forza fra cariche elettriche e la forza fra poli magnetici. Questo rapporto risultò essere precisamente uguale alla velocità della luce, e Maxwell non poteva certo considerare ciò una mera coincidenza. La luce era una radiazione elettromagnetica e con essa vi erano altre radiazioni con lunghezze d'onda molto maggiori o molto minori di quella della luce ordinaria, e tutte queste radiazioni presupponevano l'etere.

I MONOPOLI MAGNETICI.

Le equazioni di Maxwell - per inciso - sollevarono anche un problema che non è ancora stato risolto. Esse mettevano in luce una completa simmetria tra i fenomeni elettrici e quelli magnetici: ciò che valeva per gli uni doveva valere anche per gli altri. Eppure, da un punto di vista fondamentale, le due realtà apparivano diverse - una differenza che divenne ancora più sconcertante quando furono scoperte e studiate le particelle subatomiche. Esistono particelle dotate dell'una o dell'altra delle due cariche elettriche opposte - positiva o negativa - mai però di entrambe. Così, l'elettrone è fornito solo di carica elettrica negativa, mentre il positrone è fornito solo di carica elettrica positiva; non dovrebbero esserci, per analogia, particelle dotate solo di un polo magnetico nord e altre dotate solo di un polo magnetico sud? Ma questi "monopoli magnetici" sono stati cercati a lungo, invano. Qualsiasi oggetto - grande o piccolo, galassia o particella subatomica - che abbia un campo magnetico, presenta tanto un polo nord che un polo sud.

Nel 1931, Dirac, affrontando il problema da un punto di vista matematico, giunse alla conclusione che, nel caso i monopoli magnetici fossero esistiti (anche "uno solo", in qualsiasi luogo dell'universo), inevitabilmente tutte le cariche elettriche sarebbero risultate multipli esatti di una carica minima - come, in effetti, accade. E visto che tutte le cariche elettriche sono effettivamente multipli esatti di una carica minima, non se ne dovrebbe dedurre che i monopoli magnetici necessariamente esistono?

Nel 1974, un fisico olandese, Gerard't Hooft, e un fisico sovietico, Aleksandr Polyakov, dimostrarono (indipendentemente) che era possibile dedurre dalle teorie di grande unificazione che i monopoli magnetici dovevano effettivamente esistere e dovevano avere masse enormi. Un monopolo magnetico, infatti, pur dovendo essere ancora più piccolo di un protone, dovrebbe avere

una massa da 10 quadrilioni a 10 quintilioni di volte maggiore di quella del protone; avrebbe quindi la massa di un batterio, tutta concentrata entro i confini di una minuscola particella subatomica.

Particelle simili si sarebbero potute formare solo al momento del big bang; dopo di allora non si è mai più verificata una concentrazione di energia sufficiente per la loro creazione. Queste particelle si muoverebbero con velocità dell'ordine di 2,50 chilometri al secondo, e la combinazione di una massa enorme con dimensioni minuscole permetterebbe loro di scivolare attraverso la materia senza lasciare, per così dire, alcuna traccia. Questa proprietà potrebbe spiegare come mai fino a oggi non si sia riusciti a osservare i monopoli magnetici.

Tuttavia, se un monopolo passasse attraverso una bobina, esso provocherebbe l'insorgere di un impulso istantaneo di corrente elettrica (un fenomeno ben noto, che Faraday mise in evidenza per primo, come abbiamo detto nel capitolo quinto). In un avvolgimento a temperatura ordinaria un siffatto impulso comparirebbe e svanirebbe così rapidamente da sfuggire all'osservazione; ma se la bobina fosse superconduttiva, l'impulso continuerebbe a circolare fintantoché il circuito venisse mantenuto a temperatura abbastanza bassa.

Il fisico Blas Cabrera dell'Università di Stanford predispose una bobina superconduttiva di niobio e la isolò accuratamente dai campi magnetici vaganti; poi iniziò un'attesa che durò quattro mesi. Il 14 febbraio 1982, alle 13,53, si manifestò un flusso improvviso di elettricità, con intensità quasi esattamente pari a quella prevedibile in corrispondenza del passaggio di un monopolo magnetico. I fisici oggi cercano di escogitare apparecchiature che confermino questo risultato; finché non ci saranno riusciti, non si potrà asserire con certezza che il monopolo magnetico sia stato finalmente osservato.

MOTO ASSOLUTO.

Ritorniamo all'etere, che, al culmine della sua gloria, incontrò la sua Waterloo in seguito a un esperimento intrapreso per far luce su un altro problema classico, altrettanto spinoso di quello dell'azione a distanza: il problema del "moto assoluto".

Nel diciannovesimo secolo era ormai perfettamente chiaro che la terra, il sole, le stelle e tutti gli altri oggetti dell'universo erano in moto. Dove trovare, allora, un punto di riferimento fisso, un punto che fosse in quiete assoluta, per determinare il moto assoluto - il fondamento su cui erano basate le leggi del moto di Newton? C'era un'unica possibilità. Newton aveva sostenuto che la stessa struttura dello spazio (l'etere, presumibilmente) fosse in quiete, ed era questo che rendeva possibile parlare di spazio assoluto. Se l'etere era immobile, forse era possibile constatare il moto assoluto di un oggetto determinandone il moto rispetto all'etere.

Negli anni successivi al 1880 Albert Michelson concepì un metodo ingegnoso per risolvere questo problema. Se la terra si muove attraverso un etere immobile - egli pensò - un raggio di luce che viaggiasse nella direzione del suo moto e venisse riflesso dovrebbe percorrere una distanza minore di un raggio di luce diretto perpendicolarmente al moto della terra e poi riflesso. Per verificare questo ragionamento, Michelson inventò l'«interferometro», uno strumento munito di uno "specchio semitrasparente", che lascia passare metà di un raggio luminoso senza alterarne la direzione e riflette ad angolo retto l'altra metà: poi entrambi i raggi vengono riflessi da specchi fino a un oculare. Se uno dei raggi ha percorso una distanza leggermente superiore all'altro, al loro arrivo essi saranno sfasati, e formeranno delle frange d'interferenza. Lo strumento misura con estrema sensibilità le differenze di lunghezza: è talmente sensibile che potrebbe misurare tanto la crescita di una pianta di secondo in secondo, quanto il diametro di certe stelle che appaiono come punti luminosi, privi di estensione, anche con il più grande dei telescopi.

L'idea di Michelson era di puntare l'interferometro in varie direzioni rispetto al moto della terra e rivelare l'effetto dell'etere in base allo sfasamento dei due raggi di luce al loro ritorno.

Nel 1887, Michelson, con l'aiuto del chimico americano Edward Williams Morley, realizzò una versione molto sofisticata dell'esperimento.

Collocato lo strumento su una pietra che galleggiava nel mercurio, in modo da poterlo far girare in qualsiasi direzione con facilità e senza incontrare resistenza, i due ricercatori proiettarono il raggio di luce in varie direzioni rispetto al moto della terra, ma non trovarono in pratica alcuna differenza! Le frange di interferenza erano di fatto uguali, quale che fosse la direzione in cui Michelson e Morley puntavano lo strumento, e tali restarono in tutte le numerose ripetizioni dell'esperimento. (È il caso di aggiungere che analoghi esperimenti più recenti, effettuati con strumenti ancora più sensibili, hanno dato gli stessi risultati negativi.)

Le fondamenta della fisica vacillavano. O l'etere si muoveva con la terra, cosa priva di senso, oppure, forse, non esisteva affatto. In entrambi i casi, non esisteva nulla di simile al moto assoluto o allo spazio assoluto. Era come se alla fisica di Newton fosse stato strappato un tappeto da sotto i piedi. La fisica newtoniana era ancora valida nel mondo ordinario: i pianeti continuavano a muoversi in accordo con la legge di gravitazione, e anche gli oggetti sulla terra obbedivano ancora alla legge di inerzia e a quella di azione e reazione. Semplicemente, le spiegazioni classiche erano incomplete, e i fisici dovevano essere preparati a scoprire fenomeni che non avrebbero obbedito alle «leggi» classiche. I fenomeni osservati, quelli vecchi e quelli nuovi, sarebbero rimasti, ma le teorie che li spiegavano avrebbero dovuto essere ampliate e perfezionate.

L'"esperimento di Michelson e Morley" è probabilmente il più importante esperimento con risultato nullo di tutta la storia della scienza. Michelson ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1907 - e fu il primo scienziato americano a essere insignito del Nobel, anche se la motivazione non fu specificamente questo esperimento.

RELATIVITA'.

LE EQUAZIONI DI LORENTZ-FITZGERALD.

Nel 1893, il fisico irlandese George Francis FitzGerald propose una spiegazione del tutto nuova dei risultati negativi dell'esperimento di Michelson e Morley, sostenendo che la materia si contrarrebbe sempre in direzione del suo moto, e che l'entità di tale contrazione aumenterebbe con la velocità del moto stesso. Secondo tale interpretazione, lo stesso interferometro si accorcerebbe, nella direzione del «vero» moto della terra, di una quantità che compenserebbe esattamente la differente lunghezza del percorso del raggio luminoso. C'è di più: qualsiasi strumento di misura possibile, compresi gli organi di senso umani, subirebbe questa contrazione, e quindi sarebbe assolutamente impossibile misurare la contrazione stessa, muovendosi assieme all'oggetto. La spiegazione di FitzGerald lasciava quasi pensare a una «cospirazione» della natura per impedirci di misurare il moto assoluto: la natura produrrebbe un effetto che elimina esattamente qualsiasi tipo di differenza che potremmo cercare di sfruttare per osservare tale moto.

Questo fenomeno frustrante divenne noto con il nome di "contrazione di FitzGerald", e venne descritto dal suo scopritore tramite un'equazione. Un oggetto che si muova a circa 11 chilometri al secondo (pressappoco la velocità dei più veloci razzi odierni) si contrarrebbe solo di due parti su 1 miliardo, nella direzione del moto; ma a velocità veramente elevate, la contrazione diventerebbe considerevole.

A 150 mila chilometri al secondo (metà della velocità della luce) sarebbe del 15 per cento; a 262 mila chilometri al secondo (7 su 8 della velocità della luce) sarebbe del 50 per cento; cioè un regolo lungo un metro che ci passasse vicino alla velocità di 262 mila chilometri al secondo, ci apparirebbe lungo soltanto cinquanta centimetri - sempre che non stessimo anche noi muovendoci insieme a esso, e in più avessimo un sistema per misurarne la lunghezza mentre ci sfreccia vicino a tale velocità. Quando poi un oggetto avesse la velocità della luce, 300 mila chilometri al secondo, la sua lunghezza nella direzione del moto sarebbe uguale a zero. Dato che presumibilmente non possono esistere lunghezze minori di zero, se ne deve dedurre che la velocità della luce nel vuoto è la massima velocità possibile nell'universo.

Il fisico olandese Hendrik Antoon Lorentz ben presto sviluppò ulteriormente l'idea di FitzGerald. In seguito ai suoi studi sui raggi catodici egli giunse alla conclusione che, se si fosse compressa in un volume più piccolo la carica di una particella, la massa di quest'ultima avrebbe dovuto aumentare; quindi una particella in moto veloce, essendo soggetta alla contrazione di FitzGerald nella direzione del suo moto, avrebbe dovuto subire un aumento della propria massa.

Lorentz formulò un'equazione per l'aumento della massa che risultò molto simile all'equazione di FitzGerald per la contrazione. Alla velocità di 150 mila chilometri al secondo, la massa di un elettrone sarebbe aumentata del 15 per cento; a 262 mila chilometri al secondo, sarebbe aumentata del 100 per cento (cioè sarebbe raddoppiata); e alla velocità della luce, la sua massa sarebbe diventata infinita. Ancora una volta ci si trovava di fronte a una conclusione che faceva pensare che una velocità maggiore di quella della luce fosse impossibile; infatti, come poteva una massa essere più che infinita?

La contrazione di FitzGerald e l'aumento della massa previsto da Lorentz sono tanto strettamente connessi che le loro formulazioni matematiche vengono spesso riunite sotto la denominazione unica di "equazioni di Lorentz-FitzGerald".

La variazione della massa con la velocità può essere misurata da un osservatore in quiete con maggior facilità della contrazione della lunghezza. Si può determinare il rapporto tra massa e carica di un elettrone in base alla deviazione che esso subisce in un campo magnetico. Ora, via via che la velocità dell'elettrone cresceva, anche la massa avrebbe dovuto crescere, mentre non vi era ragione di pensare che la carica dovesse a sua volta crescere: pertanto, il rapporto massa-carica sarebbe aumentato e la traiettoria dell'elettrone sarebbe risultata meno incurvata. Nel 1900, il fisico tedesco Walther Kaufmann scoprì che questo rapporto aumentava con la velocità in un modo che confermava l'aumento della massa dell'elettrone che era stato previsto dalle equazioni di Lorentz-FitzGerald. Misurazioni successive e più precise mostrarono che l'accordo era praticamente perfetto.

Quando parliamo della velocità della luce come di un limite insuperabile, dobbiamo ricordare che è la velocità della luce nel vuoto (quasi 300 mila chilometri al secondo) ciò che qui ha importanza. Nei mezzi materiali trasparenti la luce si muove più lentamente, cioè con la velocità che ha nel vuoto divisa per l'indice di rifrazione del mezzo. (L'"indice di rifrazione" è una misura della deviazione subita da un raggio luminoso che, provenendo dal vuoto, penetra obliquamente nel mezzo.)

Nell'acqua, il cui indice di rifrazione è circa 1,3, la velocità della luce è 300 mila chilometri al secondo diviso 1,3, cioè circa 230 mila chilometri al secondo; nel vetro (indice di rifrazione circa 1,5), la velocità della luce è di 200 mila chilometri al secondo circa; mentre nel diamante (indice di rifrazione 2,4), la velocità della luce non supera i 125 mila chilometri al secondo.

LA RADIAZIONE E LA TEORIA DEI QUANTI DI PLANCK.

È possibile per le particelle subatomiche viaggiare in un particolare mezzo trasparente con una velocità superiore a quella che raggiunge la luce nello stesso mezzo (comunque "non superiore" a quella della luce nel vuoto). Quando ciò accade, le particelle lasciano una scia di luce azzurrastra, un po' come un aereo che, viaggiando a velocità supersoniche, lascia una scia sonora.

L'esistenza di tale radiazione fu osservata per la prima volta dal fisico russo Paul Alekseevic' Cerenkov nel 1934; la spiegazione teorica venne avanzata nel 1937 dai fisici russi Il'ja Mikhailovic' Frank e Igor Evgenevic' Tamm. I tre condivisero il premio Nobel per la fisica nel 1958.

Sono stati ideati strumenti capaci di rivelare la "radiazione Cerenkov"; questi "contatori Cerenkov" sono particolarmente adatti per studiare particelle di grande velocità, come quelle che costituiscono i raggi cosmici.

Mentre le fondamenta della fisica stavano ancora vacillando sotto i colpi inferti dall'esperimento di Michelson e Morley e dalla contrazione di FitzGerald, si verificò un secondo

terremoto. Questa volta la questione all'origine dei guai riguardava la radiazione emessa dalla materia quando viene riscaldata. (Benché solitamente tale radiazione sia costituita di luce, i fisici ne parlano come della "radiazione del corpo nero". Un corpo nero è un corpo ideale che assorbe la luce perfettamente senza rifletterne alcuna porzione, come farebbe appunto un corpo perfettamente nero, e che, reciprocamente, irraggia perfettamente in un'ampia banda di lunghezze d'onda.) Il fisico austriaco Josef Stefan aveva dimostrato, nel 1879, che la radiazione totale emessa da un corpo dipende solo dalla sua temperatura (e non dalla natura della sostanza di cui è fatto) e che, in condizioni ideali, la radiazione è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta: per esempio, se si raddoppia la temperatura assoluta, la radiazione totale aumenterà di sedici volte, essendo 16 = 2 per 2 per 2 per 2 ("legge di Stefan"). Si sapeva inoltre che, al crescere della temperatura, la radiazione predominante tende a spostarsi a lunghezze d'onda minori. Quando, per esempio, si riscalda un pezzo di acciaio, all'inizio esso irraggia soprattutto nell'infrarosso invisibile, poi diventa di un rosso cupo, quindi di un rosso brillante, poi diventa arancione, poi giallo-bianco; infine, se si potesse impedirgli di evaporare, sarebbe di un bianco azzurrastro.

Nel 1893, il fisico tedesco Wilhelm Wien elaborò una teoria che forniva un'espressione matematica della distribuzione dell'energia nella radiazione del corpo nero, cioè della quantità di energia irradiata a ogni particolare lunghezza d'onda. Questa teoria forniva una formula che descriveva accuratamente la distribuzione dell'energia all'estremo violetto dello spettro, ma non all'estremo rosso. (Per le sue ricerche sul calore Wien ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1911.) Intanto i fisici inglesi Lord Rayleigh e James Jeans formularono un'equazione che descriveva la distribuzione all'estremo rosso dello spettro, ma non funzionava assolutamente all'estremo violetto. In breve, le migliori teorie disponibili riuscivano a spiegare una delle due metà dello spettro della radiazione, ma non tutte e due contemporaneamente.

Il fisico tedesco Max Karl Ernst Ludwig Planck affrontò risolutamente il problema, e scoprì che si doveva introdurre un concetto del tutto nuovo, se si voleva ottenere un'equazione che si accordasse con i fatti. Egli avanzò l'ipotesi che la radiazione fosse fatta di piccole unità, o pacchetti, così come la materia è fatta di atomi, e chiamò l'unità di radiazione "quanto". Planck pensò che la radiazione potesse essere assorbita solo in numeri interi di quanti, e in più avanzò l'ipotesi che l'energia di un quanto dipendesse dalla lunghezza d'onda della radiazione. Minore era la lunghezza d'onda, maggiore era l'energia del quanto; o, per dirla altrimenti, il contenuto di energia del quanto era inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda.

Ora il quanto poteva essere messo direttamente in relazione con la frequenza di una data radiazione - cioè con il numero di onde emesse in un secondo. Come il contenuto di energia di un quanto, anche la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione: più corte sono le onde, maggiore è il numero che ne può essere emesso in un secondo. Ma se tanto la frequenza che il contenuto di energia del quanto erano inversamente proporzionali alla lunghezza d'onda, essi dovevano essere direttamente proporzionali tra loro. Planck espresse questa relazione per mezzo della sua equazione, divenuta famosa:

$$e = h\nu$$

Il simbolo "e" indica l'energia del quanto; "ν" (la lettera greca "nu") indica la frequenza e "h" è la "costante di Planck", che stabilisce la proporzionalità tra l'energia del quanto e la frequenza.

Il valore di "h" è estremamente piccolo, così come piccolissimo è il quanto. Le unità di radiazione sono in pratica così piccole che la luce a noi appare continua, come del resto continua ci appare la materia ordinaria. All'inizio del ventesimo secolo alla radiazione toccava la stessa sorte che era toccata alla materia all'inizio del diciannovesimo secolo: ora si doveva ammettere che entrambe fossero discontinue.

I quanti di Planck chiarirono la relazione esistente tra temperatura e lunghezza d'onda della radiazione emessa: un quanto di luce violetta aveva il doppio di energia di un quanto di luce rossa,

e naturalmente occorreva più calore per produrre un quanto violetto che per produrre un quanto rosso. Le equazioni ricavate utilizzando il concetto di quanto descrivevano assai bene la radiazione del corpo nero a entrambi gli estremi dello spettro.

Ma la teoria dei quanti di Planck era destinata a dare un contributo ancora maggiore al progresso della fisica: in seguito avrebbe spiegato il comportamento degli atomi, degli elettroni negli atomi e dei nucleoni nei nuclei atomici. Oggi la fisica precedente alla teoria dei quanti viene chiamata "fisica classica", e quella successiva, "fisica moderna". A Planck venne assegnato il premio Nobel per la fisica nel 1918.

EINSTEIN E IL DUALISMO ONDA-PARTICELLA.

La teoria di Planck non suscitò molto scalpore tra i fisici quando fu proposta, nel 1900. Era troppo rivoluzionaria per essere accettata subito. Lo stesso Planck sembrava sgomento di quanto aveva fatto. Ma, cinque anni dopo, un giovane fisico svizzero nato in Germania, che portava il nome di Albert Einstein, verificò l'esistenza dei quanti di Planck.

Il fisico tedesco Philipp Lenard aveva scoperto che la luce, colpendo certi metalli, provocava l'emissione di elettroni dalla loro superficie, come se la forza della luce espellesse gli elettroni dagli atomi. Il fenomeno prese il nome di "effetto fotoelettrico", e per la sua scoperta Lenard ricevette nel 1905 il premio Nobel per la fisica.

Quando i fisici cominciarono a fare esperimenti su questo fenomeno, scoprirono, con grande sorpresa, che se si aumentava l'intensità della luce, l'energia degli elettroni emessi non aumentava: ciò che li influenzava, invece, erano i diversi valori della lunghezza d'onda della luce usata: per esempio, la luce blu conferiva agli elettroni maggior velocità della luce gialla; una luce blu molto debole causava l'emissione di un numero di elettroni minore rispetto a una intensa luce gialla; ma quei pochi elettroni espulsi dalla luce blu viaggiavano con una velocità maggiore di quella di qualsiasi elettrone ottenuto usando luce gialla. La luce rossa di qualsiasi intensità, invece, in certi metalli non provocava affatto l'emissione di elettroni.

Nessuno di questi fenomeni poteva essere spiegato dalle vecchie teorie della luce. Perché mai la luce blu doveva riuscire a fare qualcosa che la luce rossa non poteva fare?

Einstein trovò la risposta nella teoria dei quanti di Planck. Per assorbire abbastanza energia da abbandonare la superficie del metallo, un elettrone doveva essere colpito da un quanto di energia superiore a un valore minimo. Nel caso di un elettrone legato solo debolmente al suo atomo (come accade per il cesio), anche un quanto di luce rossa poteva bastare; ma, se un atomo tratteneva i suoi elettroni con maggior forza, occorreva luce gialla, o blu, o addirittura ultravioletta. In ogni caso, maggiore era l'energia del quanto, maggiore era anche la velocità dell'elettrone espulso dal metallo.

Qui la teoria dei quanti spiegava un fenomeno fisico con semplicità perfetta, mentre le concezioni prequantistiche della luce non erano in grado di farlo. Seguirono ben presto numerose altre applicazioni della meccanica quantistica. Per la sua interpretazione dell'effetto fotoelettrico (e non per la teoria della relatività), Einstein ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1921.

Nella sua teoria della relatività ristretta, proposta nel 1905 ed elaborata nel tempo libero, mentre era impiegato all'Ufficio brevetti svizzero, Einstein formulò una concezione fondamentalmente nuova dell'universo, basata su un'estensione della teoria dei quanti. Egli avanzò l'ipotesi che la luce viaggiasse nello spazio sotto forma di quanti (il termine "fotone" per queste unità di luce fu introdotto da Compton nel 1928), riesumando così l'idea che la luce avesse natura corpuscolare. Si trattava, però, di un nuovo tipo di particella, che aveva tanto le proprietà di un'onda che quelle di un corpuscolo, ed esibiva in momenti diversi un gruppo di proprietà o l'altro, alternativamente.

Potrebbe sembrare un paradosso, o addirittura qualcosa di mistico, quasi che la vera natura della luce superasse ogni possibilità di comprensione umana. Al contrario, io vorrei spiegare il concetto ricorrendo a un'analogia: un uomo può avere molti aspetti - marito, padre, amico, uomo

d'affari. A seconda delle circostanze e dell'ambiente in cui si trova, si comporta da marito, da padre, da amico o da uomo d'affari. Nessuno si aspetta che egli esibisca il suo comportamento maritale con un cliente o il suo comportamento di uomo d'affari con la moglie; eppure, un simile uomo non ha nulla di paradossale né è qualcosa di più di un singolo uomo.

Analogamente, la radiazione ha proprietà tanto corpuscolari che ondulatorie: in determinate situazioni sono salienti le prime, in altre le seconde. Verso il 1930, Niels Bohr sostenne che qualsiasi esperimento destinato a studiare le proprietà ondulatorie della luce non avrebbe potuto rivelare le sue proprietà corpuscolari, e viceversa. Si poteva studiare un gruppo di proprietà alla volta, mai entrambe contemporaneamente. È questo il "principio di complementarità". Tale duplice insieme di proprietà riesce a descrivere la radiazione meglio di quanto non possa fare ciascuno dei due insiemi da solo.

La scoperta della natura ondulatoria della luce aveva permesso tutti i trionfi dell'ottica del diciannovesimo secolo, ivi compresa la spettroscopia, ma aveva anche chiesto ai fisici di ammettere l'esistenza dell'etere. Ora la concezione einsteiniana del dualismo onda-particella, pur conservando tutte le conquiste del diciannovesimo secolo (comprese le equazioni di Maxwell), consentiva di lasciar cadere l'assunto dell'esistenza dell'etere. La radiazione poteva viaggiare nel vuoto in virtù delle proprie caratteristiche corpuscolari, e il concetto di etere, già colpito a morte dall'esperimento di Michelson e Morley, ora poteva essere sepolto. Einstein introdusse una seconda idea importante nella teoria della relatività ristretta: quella che la velocità della luce nel vuoto non vari mai, indipendentemente dal moto della sua sorgente. Secondo la concezione newtoniana dell'universo, un raggio luminoso proveniente da una sorgente che si sta avvicinando all'osservatore deve apparire più veloce di un raggio proveniente da una sorgente che si muove in qualsiasi altra direzione; nella concezione einsteiniana, questo, viceversa, non si verifica. Da tale postulato Einstein fu in grado di dedurre le equazioni di Lorentz-FitzGerald, mostrando che l'aumento della massa con la velocità, che Lorentz aveva attribuito solo alle particelle cariche, si verificava per oggetti qualsiasi. Einstein inoltre giunse alla conclusione che un aumento di velocità, oltre a causare la contrazione delle lunghezze e l'aumento della massa, doveva anche rallentare il tempo: in altre parole, mentre il metro si sarebbe accorciato, gli orologi avrebbero scandito il tempo più lentamente.

LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ.

L'aspetto più fondamentale della teoria di Einstein era la negazione dell'esistenza dello spazio assoluto e del tempo assoluto. Questo potrebbe apparire senza senso: come può la mente umana apprendere qualcosa sull'universo senza alcun punto di partenza? Einstein rispondeva che tutto quanto occorre è un "sistema di riferimento" a cui rapportare gli eventi dell'universo. Qualsiasi sistema di riferimento sarà ugualmente valido: la terra considerata immobile, il sole considerato immobile, o noi stessi considerati immobili.

Possiamo, semplicemente, scegliere il sistema che più è conveniente. È più comodo calcolare i moti dei pianeti in un sistema di riferimento in cui il sole è immobile che in uno in cui lo è la terra - ma il primo sistema non è per questo più vero.

Così, le misurazioni dello spazio e del tempo sono «relative» a un sistema di riferimento arbitrariamente scelto - ed è questa la ragione per cui la teoria di Einstein si chiama "teoria della relatività".

Facciamo un esempio: supponiamo di osservare, stando qui sulla terra, uno strano pianeta (Pianeta X), esattamente uguale al nostro per massa e dimensioni, che ci sfrecciasse vicino alla velocità, rispetto a noi, di 262 mila chilometri al secondo. Se potessimo misurare le sue dimensioni mentre ci sfiora, troveremmo che si è contratto del 50 per cento nella direzione del suo moto. Sarebbe un ellissoide anziché una sfera; inoltre a un'ulteriore misurazione la sua massa risulterebbe doppia di quella della terra.

Eppure, a un uomo sul Pianeta X sembrerebbe di essere fermo su un pianeta immobile; egli inoltre riterrebbe che fosse la terra a sfiorarlo, alla velocità di 262 mila chilometri al secondo, e la terra gli apparirebbe di forma ellissoidale e di massa doppia di quella del proprio pianeta.

Si sarebbe tentati di chiedere quale pianeta si sia "realmente" contratto nella direzione del moto e abbia "realmente" raddoppiato la propria massa; ma l'unica risposta possibile dipende dal sistema di riferimento. Se trovate frustrante l'idea, pensate al fatto che l'uomo è piccolo in confronto a una balena e grande in confronto a un insetto. Che senso ha dunque chiedersi se l'uomo sia "in realtà" grande o piccolo?

Nonostante tutte le sue insolite implicazioni, la relatività spiega tutti i fenomeni noti dell'universo almeno altrettanto bene quanto le teorie prerelativistiche; essa, però, va oltre, spiegando in modo semplice alcuni fenomeni che la concezione newtoniana spiegava in modo insoddisfacente o non spiegava affatto. Di conseguenza, quella di Einstein è stata accettata, rispetto a quella di Newton, non già come una teoria sostitutiva, ma come una teoria più perfezionata. Si può ancora utilizzare la concezione newtoniana dell'universo come un'approssimazione semplificata che funziona abbastanza bene nella vita ordinaria e anche nell'astronomia comune, perfino per mettere in orbita dei satelliti; quando però si tratta, per esempio, di accelerare delle particelle in un sincrotrone, si deve tener conto dell'aumento einsteiniano della massa con la velocità, se si vuole che la macchina funzioni.

LO SPAZIO-TEMPO E IL PARADOSSO DEGLI OROLOGI.

La concezione einsteiniana dell'universo intreccia tra loro spazio e tempo in modo tale che non ha più senso parlare dell'uno o dell'altro separatamente. L'universo è quadridimensionale, e il tempo è una delle sue dimensioni (che però non si comporta esattamente come le ordinarie dimensioni spaziali, lunghezza, larghezza e altezza). Si usa indicare questa fusione quadridimensionale con il termine "spazio-tempo", concetto che fu introdotto, nel 1907, da uno dei maestri di Einstein, il matematico russo-tedesco Hermann Minkowski.

Spazio e tempo giocano strani scherzi nella relatività: uno degli aspetti della teoria che suscita ancora discussioni tra i fisici è l'idea di Einstein del rallentamento degli orologi. Un orologio in moto, diceva Einstein, segna il tempo più lentamente di un orologio in quiete. In effetti, tutti i fenomeni variabili nel tempo variano più lentamente in moto che in quiete, il che equivale a dire che il tempo stesso rallenta. A velocità ordinarie, l'effetto è trascurabile, ma a 262 mila chilometri al secondo un orologio sembrerebbe (a un osservatore che lo guardasse passare) impiegare due secondi per batterne uno. Alla velocità della luce, poi, l'orologio sembrerebbe fermo.

La dilatazione del tempo è più sconcertante degli effetti che implicano lunghezza e massa. Se un oggetto si riduce alla metà della propria lunghezza e poi ritorna alla lunghezza normale, o se raddoppia il proprio peso e poi riprende quello normale, non resta alcuna traccia che indichi tale cambiamento transitorio, e non vi sono due punti di vista opposti che entrano in conflitto.

Il tempo, invece, è cumulativo. Se un orologio sul Pianeta X, a causa della sua grande velocità, sembra marciare a ritmo dimezzato per un'ora, e se poi ritorna in quiete, esso, pur riprendendo il suo ritmo di marcia normale, conserverà traccia di quanto avvenuto nel fatto di essere indietro di mezz'ora! Allora, consideriamo due navi spaziali che si passino accanto, ciascuna ritenendo che l'altra si muova alla velocità di 262 mila chilometri al secondo, con un tempo rallentato della metà: quando le due astronavi poi si riincontreranno, gli osservatori situati su ciascuna si aspetteranno che l'orologio dell'altra astronave sia rimasto indietro di mezz'ora rispetto al proprio. Ma non è possibile che ciascuno dei due orologi sia indietro rispetto all'altro. Cosa sarà accaduto allora? Questo problema prende il nome di "paradosso degli orologi".

In realtà, non c'è nessun paradosso. Anche se una delle due astronavi passasse come una saetta vicino all'altra e ciascuno dei due equipaggi giurasse che l'orologio dell'altra astronave era più lento, non avrebbe alcuna importanza stabilire quale orologio fosse «realmente» più lento; le due

astronavi si allontanerebbero infatti per sempre e i due orologi non verrebbero mai più portati nello stesso posto allo stesso momento per essere confrontati: il paradosso degli orologi non si presenterebbe mai. In effetti la teoria della relatività ristretta di Einstein è valida solo per il moto rettilineo uniforme, così che all'interno di tale teoria si può parlare solo di separazioni definitive.

Supponiamo, invece, che le due navi spaziali si riincontrino dopo il rapido passaggio dell'una accanto all'altra, in modo che si possano confrontare i due orologi. Perché ciò accada, deve verificarsi un fatto nuovo. Almeno una delle due navi spaziali deve accelerare.

Supponiamo che sia l'astronave B a farlo - cioè che essa rallenti, descriva un'ampia curva e poi acceleri finché raggiunge l'astronave A.

Naturalmente B potrebbe scegliere di considerarsi in quiete; secondo tale scelta del sistema di riferimento, sarà A che effettua tutte le variazioni di velocità, in modo da accostarsi a B. Se nell'universo non esistessero che queste due astronavi, allora sì che, in virtù di questa situazione simmetrica, insorgerebbe il paradosso degli orologi.

Tuttavia, A e B "non" sono tutto ciò che esiste nell'universo - il che distrugge la simmetria. Quando B accelera, lo fa non solo rispetto ad A, ma anche rispetto a tutto il resto dell'universo. Se B sceglie di considerarsi in quiete, deve considerare non solo A, ma tutte le galassie, senza alcuna eccezione, come accelerate rispetto a se stessa. In breve, è B contro l'universo intero. In tale situazione, è l'orologio di B che resta indietro di mezz'ora, non quello di A.

Questo fenomeno comporta delle conseguenze per i viaggi spaziali. Se gli astronauti che si allontanano dalla terra accelerassero fino a raggiungere quasi la velocità della luce, il tempo per loro passerebbe molto più lentamente che per noi. Essi potrebbero raggiungere una destinazione molto lontana e far ritorno nel giro di quelle che a loro sembrerebbero settimane, mentre nel frattempo sarebbero passati sulla terra molti secoli. Secondo questa ipotesi della dilatazione del tempo con il moto, si potrebbe addirittura fare un viaggio fino a una stella lontana durante l'arco di una vita umana - ma naturalmente chi intraprendesse tale viaggio dovrebbe dire addio per sempre alla propria generazione e al mondo che conosce, perché ritornerebbe nel mondo del futuro.

LA GRAVITÀ E LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ GENERALE DI EINSTEIN.

Nella teoria della relatività ristretta, Einstein non si occupò del moto accelerato né della gravitazione. Trattò invece questi temi nella teoria della relatività generale, pubblicata nel 1915. La teoria della relatività generale presentava una concezione completamente nuova della gravitazione, considerandola come una proprietà dello spazio anziché come una forza che si esercita tra i corpi. Come effetto della presenza della materia, lo spazio si incurva, e i corpi, per così dire, seguono la linea di minor resistenza tra tutte le curve. Per strana che potesse apparire questa concezione di Einstein, essa riusciva a spiegare qualcosa che la teoria newtoniana della gravitazione non era riuscita a spiegare.

Il più grande trionfo della legge di gravitazione di Newton si era avuto nel 1846, con la scoperta di Nettuno (vedi capitolo terzo). Dopo di ciò, sembrava che nulla avrebbe potuto scuotere le fondamenta di tale legge. Restava inspiegato, tuttavia, un altro moto planetario: il perielio di Mercurio, cioè il punto della sua orbita in cui esso si trova più vicino al sole, si sposta da una rivoluzione alla successiva, avanzando con continuità lungo l'orbita del pianeta. Gli astronomi erano riusciti a spiegare gran parte di tale anomalia come causata da perturbazioni dell'orbita provocate dall'attrazione dei pianeti vicini.

In effetti, nei primi tempi in cui si era applicata la teoria della gravitazione al sistema solare, si era pensato che le perturbazioni causate dal variare dell'attrazione di un pianeta su un altro potessero finire per demolire il delicato meccanismo del sistema solare. Nei primi decenni del diciannovesimo secolo, tuttavia, Laplace aveva dimostrato che il sistema solare non era poi tanto fragile. Le perturbazioni sono tutte cicliche, e le irregolarità orbitali non superano mai un certo valore in alcuna direzione. Alla lunga, il sistema solare è stabile e gli astronomi erano più che mai

sicuri che prima o poi si sarebbe riusciti a spiegare tutte le irregolarità particolari, tenendo conto delle perturbazioni.

Ma questa speranza non si era avverata per Mercurio. Anche tenendo conto di tutte le perturbazioni, restava inspiegato un avanzamento del perielio del pianeta, che ammontava a 43 secondi di arco per secolo. Questo moto, scoperto da Leverrier nel 1845, non è gran cosa; in 4000 anni comporta uno spostamento pari soltanto all'ampiezza della luna.

Era tuttavia abbastanza per dar da pensare agli astronomi.

Leverrier suggerì che questa anomalia fosse forse dovuta a un piccolo pianeta non ancora scoperto, più vicino al sole di Mercurio. Per decenni gli astronomi andarono alla ricerca dell'ipotetico pianeta (chiamato Vulcano) e più volte venne annunciata la sua scoperta, sempre però smentita in seguito. Infine si giunse concordemente alla conclusione che Vulcano non esisteva.

La teoria della relatività generale di Einstein fornì la soluzione, mostrando che il perielio di qualsiasi corpo animato da un moto di rivoluzione doveva avere un altro movimento, oltre a quello previsto dalla legge di Newton. Quando i nuovi calcoli furono applicati a Mercurio, si trovò un accordo completo con le osservazioni. I pianeti più lontani di Mercurio dal sole dovevano presentare spostamenti del perielio sempre minori. Nel 1960 si scoprì che il perielio di Venere avanzava di 8 secondi di arco per secolo, valore quasi perfettamente in accordo con la teoria di Einstein.

Ancora più impressione fecero le scoperte di due nuovi fenomeni inaspettati, che erano stati previsti solo dalla teoria di Einstein.

Innanzitutto, Einstein aveva previsto che un intenso campo gravitazionale avrebbe dovuto rallentare le vibrazioni di un atomo; tale rallentamento sarebbe stato messo in evidenza da uno spostamento verso il rosso delle righe spettrali ("spostamento di Einstein").

Cercando un campo gravitazionale abbastanza forte da produrre un simile effetto, Eddington pensò alle nane bianche: infatti la luce emessa da una stella così densa doveva perdere energia in misura osservabile per vincere l'intensa gravità alla superficie della stella. Nel 1925 W. S. Adams, che era stato il primo a dimostrare quale immensa densità avessero tali stelle, studiò le righe spettrali della luce delle nane bianche e trovò lo spostamento verso il rosso previsto.

La verifica della seconda previsione di Einstein fu ancora più sensazionale. La sua teoria prevedeva che un campo gravitazionale avrebbe dovuto incurvare i raggi luminosi; Einstein aveva calcolato che un raggio di luce che sfiorasse la superficie del sole sarebbe stato incurvato rispetto a una linea retta di 1,75 secondi di arco.

Come si poteva verificare questo asserto? Se fosse stato possibile osservare le stelle lontane ma molto prossime al bordo del disco solare, durante un'eclissi di sole, e confrontare le loro posizioni con quelle che esse stesse avevano quando il sole non si trovava in prossimità del percorso dei loro raggi di luce, qualsiasi spostamento dovuto alla curvatura della luce avrebbe dovuto essere visibile. Einstein aveva pubblicato la sua memoria sulla relatività generale nel 1915, ma la verifica dovette attendere fino alla fine della prima guerra mondiale. Nel 1919 la Royal Astronomical Society inglese organizzò una spedizione per effettuare tale verifica, assistendo a un'eclissi totale che era visibile dall'isola di Principe, un isolotto portoghese al largo delle coste occidentali dell'Africa. Le stelle mostrarono effettivamente un cambiamento di posizione. Ancora una volta i fatti avevano dato ragione ad Einstein.

In base allo stesso principio, se una stella si trovasse esattamente dietro a un'altra, la luce di quella più lontana si incurverebbe in prossimità della stella più vicina, in modo tale che quella più lontana risulterebbe ingrandita. La stella più vicina fungerebbe da lente gravitazionale. Purtroppo, le dimensioni apparenti delle stelle sono talmente piccole che è estremamente rara un'eclissi di una stella distante ad opera di una stella più vicina (dal punto di vista della terra). La scoperta delle quasar fornì però agli astronomi una nuova opportunità. All'inizio degli anni ottanta, essi hanno osservato delle quasar doppie in cui i due membri hanno esattamente le stesse proprietà. È ragionevole supporre che ciò che vediamo sia un'unica quasar la cui luce è distorta da una galassia

(o forse da un buco nero) che si trova sulla linea visuale, ma ci è invisibile: l'immagine della quasar risulta distorta, così da apparire doppia. (Un'imperfezione di uno specchio potrebbe sortire lo stesso effetto sulla nostra immagine riflessa.)

VERIFICHE DELLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ GENERALE.

Le prime vittorie della teoria della relatività generale di Einstein furono tutte di natura astronomica. Gli scienziati desideravano però trovare un modo per verificarla in laboratorio, in condizioni che essi stessi potessero variare a piacimento. La possibilità di una siffatta prova di laboratorio si profilò nel 1958, quando il fisico tedesco Rudolf Ludwig Mössbauer mostrò che, in certe condizioni, si può fare in modo che un cristallo produca un fascio di raggi gamma di lunghezza d'onda rigorosamente definita. Di solito, l'atomo che emette raggi gamma rincula, e questo movimento allarga la banda delle lunghezze d'onda prodotte. Nei cristalli sottoposti a determinate condizioni, un intero cristallo si comporta come un singolo atomo: il rinculo è distribuito fra tutti gli atomi così che praticamente si annulla; il raggio gamma emesso ha allora lunghezza d'onda estremamente definita.

Un tale raggio può venire assorbito con straordinaria efficienza da un cristallo analogo a quello che l'ha prodotto, mentre non verrà assorbito se i raggi gamma avranno una lunghezza d'onda anche di pochissimo diversa da quella che il cristallo produrrebbe naturalmente. Questo viene chiamato "effetto Mössbauer".

Se un fascio di raggi gamma di questo genere viene emesso verso il basso, in modo da subire l'effetto della gravità, secondo la teoria della relatività generale deve acquistare energia; pertanto la sua lunghezza d'onda deve diminuire. Una caduta non più lunga di qualche centinaio di metri dovrebbe bastare a fargli acquistare l'energia sufficiente a far diminuire la sua lunghezza d'onda abbastanza perché il fascio non sia più assorbito dal cristallo.

Se poi il cristallo che emette i raggi gamma viene spostato verso l'alto mentre ha luogo l'emissione, la lunghezza d'onda del raggio gamma aumenterà per l'effetto Doppler-Fizeau. Si può fare in modo che la velocità con cui il cristallo è spostato verso l'alto neutralizzi l'effetto della gravitazione sui raggi gamma in caduta, così che questi vengano nuovamente assorbiti dal cristallo.

Esperimenti condotti nel 1960 e negli anni successivi si sono basati sull'effetto Mössbauer per confermare la teoria della relatività generale con grande precisione, fornendo una delle più convincenti dimostrazioni della sua validità che si sia avuta fino a oggi; a Mössbauer venne assegnato il premio Nobel per la fisica nel 1961.

Anche altre misurazioni di precisione tendono a confermare la relatività generale: l'invio di segnali radar verso i pianeti, il comportamento delle pulsar binarie nel loro moto di rivoluzione intorno al comune centro di gravità, e altro ancora. Sono tutte misurazioni al limite del possibile, e i fisici hanno fatto numerosi tentativi di elaborare teorie alternative. Tra tutte le teorie suggerite, però, quella di Einstein è la più semplice dal punto di vista matematico. Ogniqualvolta è stato possibile fare delle misurazioni al fine di discriminare tra le varie teorie (sempre lavorando su differenze minime), è stata quella di Einstein a sembrare confermata. Dopo quasi tre quarti di secolo, la teoria della relatività generale ha mantenuto la sua validità, anche se gli scienziati seguitano (e fanno bene) a metterla in discussione. (Sia ben chiaro: è la relatività "generale" che viene messa in discussione; la relatività "ristretta", invece, è stata verificata un tal numero di volte e in tanti modi differenti che nessun fisico ormai pensa più a confutarla.)

IL CALORE.

Fino ad ora, in questo capitolo, non mi sono occupato di un fenomeno che accompagna abitualmente la luce nella nostra esperienza di tutti i giorni: in generale, tutti gli oggetti luminosi, dalle stelle alle candele, emettono, oltre che luce, anche calore.

MISURAZIONE DELLA TEMPERATURA.

Prima dell'epoca moderna il calore è stato studiato solo dal punto di vista qualitativo. La gente si accontentava di dire: «fa caldo», oppure «fa freddo!», o ancora «questo è più caldo di quest'altro». Per poter fare della temperatura una grandezza misurabile, occorreva prima trovare qualche mutamento misurabile che si accompagnasse regolarmente alle variazioni di temperatura: si scoprì che un mutamento di questo genere era dato dal fatto che le sostanze, quando vengono scaldate, si espandono e quando vengono raffreddate, si contraggono. Galileo fu il primo a cercare di sfruttare questo fenomeno per studiare i cambiamenti di temperatura. Nel 1603, egli collocò un tubo di vetro capovolto contenente aria calda in una vaschetta piena di acqua: l'aria del tubo, raffreddandosi fino a raggiungere la temperatura ambiente, si contraeva, causando la salita dell'acqua della vaschetta dentro il tubo. Galileo aveva così costruito un "termometro" (dalle parole greche che significano «misura del calore»). Al variare della temperatura della stanza, variava anche il livello raggiunto dall'acqua nel tubo. Se la stanza veniva riscaldata, l'aria nel tubo si espandeva, facendo abbassare il livello dell'acqua; se invece diventava più fredda, l'aria si contraeva e il livello dell'acqua saliva. L'unico inconveniente veniva dal fatto che l'acqua della bacinella era esposta all'aria, e anche la pressione dell'aria mutava di continuo, causando a sua volta una variazione del livello dell'acqua nel tubo, indipendentemente dalla temperatura, il che confondeva i risultati. Il termometro fu il primo importante strumento scientifico fatto di vetro.

Attorno al 1654, il granduca di Toscana, Ferdinando Secondo, aveva realizzato un termometro che era indipendente dalla pressione dell'aria: esso era costituito da un bulbo attaccato a un tubo rettilineo, nel quale veniva sigillato del liquido. La contrazione e l'espansione del liquido facevano da indicatori delle variazioni di temperatura. I liquidi cambiano di volume con la temperatura molto meno di quanto non facciano i gas; ma se il bulbo era capace e pieno in modo che il liquido potesse espandersi solamente in un tubicino molto stretto, si potevano rendere evidenti la salita e la discesa anche nel caso di un piccolo cambiamento di volume.

Il fisico inglese Robert Boyle fece qualcosa di molto simile all'incirca nello stesso periodo, e fu il primo a dimostrare che il corpo umano ha una temperatura costante, notevolmente superiore alla consueta temperatura ambiente. Altri dimostrarono che certi fenomeni fisici avvengono sempre alla stessa temperatura. Prima della fine del diciassettesimo secolo si sapeva che questo era il caso della fusione del ghiaccio e dell'ebollizione dell'acqua.

I primi liquidi usati nella termometria furono l'acqua e l'alcool. Ma l'acqua congelava troppo presto e l'alcool evaporava troppo facilmente; così il fisico francese Guillaume Amontons ricorse al mercurio. Nello strumento da lui ideato, come in quello di Galileo, l'espansione e la contrazione dell'aria facevano salire o scendere il livello del mercurio.

Poi, nel 1714, il fisico tedesco Gabriel Daniel Fahrenheit combinò le migliorie del granduca e quelle di Amontons, mettendo del mercurio in un tubo chiuso e usando la sua espansione e la sua contrazione come indicatori della temperatura. Fahrenheit fece di più: segnò sul tubo una scala graduata, in modo da poter effettuare una lettura quantitativa della temperatura.

Non si sa con precisione in quale modo Fahrenheit giunse alla scelta della sua scala; secondo una versione dei fatti, egli avrebbe posto lo zero in corrispondenza della temperatura più bassa che era riuscito a raggiungere nel suo laboratorio, mescolando sale e ghiaccio fondente; poi fece corrispondere il 32 e il 212 rispettivamente al punto di congelamento e al punto di ebollizione dell'acqua pura. Ciò presentava due vantaggi: primo, l'intervallo delle temperature in cui l'acqua era liquida risultava così pari a 180, un numero legato all'uso dei "gradi"; infatti vi sono 180 gradi in una semicirconferenza; secondo, la temperatura corporea veniva ad aggirarsi sui 100 gradi, essendo normalmente, per l'esattezza, di 98,6 gradi Fahrenheit.

Solitamente la temperatura corporea è così costante che, quando supera di più di un grado circa la media, si dice che il soggetto ha la febbre, e si riscontrano chiari sintomi di malattia. Nel

1858, il medico tedesco Karl August Wunderlich introdusse la procedura di controllare frequentemente la temperatura corporea come indicazione del decorso della malattia. Nel decennio successivo il medico inglese Thomas Clifford Allbutt inventò il "termometro clinico", che ha una strozzatura nel tubicino contenente il mercurio; il filo di mercurio sale, raggiungendo un massimo, quando il termometro vien tenuto, per esempio, nella bocca, ma non ridiscende quando lo si toglie: esso si spezza in corrispondenza della strozzatura, e ciò permette di leggere quando si vuole la temperatura, che è indicata dalla porzione di mercurio rimasta al di sopra della strozzatura stessa. Negli Stati Uniti è tuttora usata la scala Fahrenheit per le faccende di tutti i giorni, come i bollettini meteorologici e i termometri clinici.

Nel 1742, l'astronomo svedese Anders Celsius adottò invece un'altra scala, che, nella sua forma definitiva, pone in corrispondenza del punto di congelamento dell'acqua lo zero, e in corrispondenza del suo punto di ebollizione il 100. Siccome la divisione dell'intervallo di temperatura in cui l'acqua è liquida è in cento parti, questa scala è chiamata "centigrada". Parlando di questa scala, si usa spesso l'espressione "gradi centigradi"; ma gli scienziati, in una conferenza internazionale del 1948, l'hanno ribattezzata "scala Celsius", in onore del suo inventore, come si era già fatto per la scala Fahrenheit; pertanto, volendo seguire la nomenclatura ufficiale, si dovrebbe parlare di gradi Celsius. Il simbolo "C", comunque, va bene ugualmente. È stata la scala Celsius ad affermarsi ovunque nel mondo civile, e anche gli Stati Uniti stanno cercando di adeguarsi a quest'uso. Gli scienziati in particolare hanno trovato molto conveniente la scala Celsius.

DUE TEORIE DEL CALORE.

La temperatura misura l'intensità del calore, ma non la sua quantità. Il calore passa sempre da un corpo a temperatura maggiore a uno a temperatura minore, fino a quando le temperature sono uguali, così come l'acqua scende da un livello superiore a uno inferiore finché i livelli sono uguali. Il calore si comporta in tal modo indipendentemente dalle quantità di calore contenute nei corpi interessati. Nonostante il fatto che una vasca da bagno di acqua tiepida contenga molto più calore di un fiammifero acceso, mettendo il fiammifero vicino all'acqua il calore passerà da questo all'acqua e non viceversa.

Joseph Black, che aveva svolto importanti ricerche anche sui gas (vedi capitolo quinto), fu il primo a chiarire la distinzione tra temperatura e calore. Nel 1760, egli stabilì che sostanze diverse aumentavano di temperatura in misura differente quando si forniva loro una data quantità di calore. Per innalzare di un grado Celsius la temperatura di 1 grammo di ferro occorre il triplo di calore che per riscaldare di 1 grado 1 grammo di piombo. Il berillio, poi, richiede il triplo del calore richiesto dal ferro.

Black dimostrò inoltre che era possibile fornire calore a una sostanza senza farne innalzare la temperatura. Riscaldando del ghiaccio fondente, se ne affretta la fusione, ma la temperatura del ghiaccio non aumenta: il calore finirà per far sciogliere tutto il ghiaccio, ma, durante il processo, la temperatura del ghiaccio non supererà mai lo zero. Analogamente vanno le cose con l'ebollizione dell'acqua a 100 gradi: se si fornisce ulteriore calore, si farà evaporare più acqua, senza comunque alterare la temperatura del liquido.

Lo sviluppo della macchina a vapore (vedi capitolo nono), che iniziò all'incirca all'epoca degli esperimenti di Black, accrebbe l'interesse degli scienziati per il calore e la temperatura, spingendoli a riflettere sulla natura del calore, come già avevano fatto per la natura della luce.

Anche nel caso del calore, come in quello della luce, esistevano due teorie: l'una riteneva che il calore fosse una sostanza materiale, che si poteva versare o far passare da un corpo a un altro, e che veniva chiamata "calorico". Secondo questa concezione, quando il legno bruciava, il calorico in esso contenuto passava nella fiamma, da lì nella pentola posta sul fuoco, e dalla pentola nell'acqua in essa contenuta. Quando l'acqua era piena di calorico, diventava vapore.

Quanto alla seconda teoria, verso la fine del diciottesimo secolo due osservazioni famose diedero origine a una ipotesi che considerava il calore come una forma di vibrazione: una di queste osservazioni si deve al fisico e avventuriero americano Benjamin Thompson, un lealista che abbandonò il paese durante la rivoluzione, fu insignito del titolo di conte Rumford e poi seguitò a girare in lungo e in largo per l'Europa. Nel 1798, trovandosi in Baviera a dirigere le operazioni di alesatura dei cannoni, egli notò che venivano prodotte grandi quantità di calore, sufficienti a portare 18 libbre di acqua al punto di ebollizione in meno di 3 ore. Da dove veniva tutto questo calorico? Thompson concluse che il calore doveva essere una vibrazione prodotta e intensificata dall'attrito meccanico dell'utensile contro il metallo.

L'anno successivo il chimico Humphry Davy effettuò un esperimento ancora più significativo: mantenendo due pezzi di ghiaccio sotto la temperatura di congelamento, li strofinò l'uno contro l'altro, non con le mani ma con un congegno meccanico, in modo da evitare qualsiasi flusso di calorico verso il ghiaccio: riuscì così a fonderne parte mediante il solo attrito. Anch'egli giunse alla conclusione che il calore dovesse essere una vibrazione e non una sostanza materiale. In realtà questo esperimento avrebbe dovuto essere decisivo; ma la teoria del calorico, benché evidentemente sbagliata, sopravvisse fino alla metà del diciannovesimo secolo.

IL CALORE COME ENERGIA.

Anche se la natura del calore era scarsamente compresa, gli scienziati raggiunsero qualche importante conoscenza in proposito, come già era successo ai ricercatori che avevano studiato la luce, i quali erano riusciti a chiarire alcuni aspetti importanti della riflessione e della rifrazione della luce prima di aver compreso la natura di quest'ultima. I fisici francesi Jean Baptiste Joseph Fourier, nel 1822, e Nicholas Léonard Sadi Carnot, nel 1824, studiarono il flusso del calore compiendo notevoli passi in avanti. Carnot viene anzi solitamente considerato il fondatore della scienza detta "termodinamica" (dalle parole greche che significano «movimento del calore»); egli diede solide fondamenta teoriche al funzionamento della macchina a vapore.

A partire dal 1840 i fisici incominciarono a chiedersi in che modo il calore contenuto nel vapore potesse convertirsi in lavoro meccanico, mettendo in moto uno stantuffo. Esiste un limite alla quantità di lavoro che si può ottenere da una data quantità di calore? Analoghe domande suscitava il processo inverso: come avviene la conversione del lavoro in calore?

Joule dedicò trentacinque anni a convertire varie forme di lavoro in calore, facendo con estrema precisione quello che Rumford aveva fatto in precedenza, ma in maniera approssimativa. Joule misurò la quantità di calore prodotta da una corrente elettrica; riscaldò l'acqua e il mercurio agitandoli con ruote a pale, o forzando l'acqua a passare in tubicini sottili; riscaldò l'aria comprimendola, e così via. In tutti i casi, calcolò quanto lavoro meccanico fosse stato compiuto sul sistema e quanto calore si fosse ottenuto come risultato, e stabilì che una data quantità di lavoro, di qualsiasi genere, produce sempre la stessa quantità di calore. In altre parole, Joule determinò "l'equivalente meccanico della caloria".

Dato che si poteva convertire il calore in lavoro, si doveva considerare il calore come una forma di "energia" (il termine energia, derivato dal greco, significa proprio «che contiene lavoro»). Elettricità, magnetismo, luce e moto, possono tutti essere usati per compiere lavoro, e sono quindi tutti forme di energia. Il lavoro stesso, essendo convertibile in calore, è una forma di energia.

Queste idee mettevano in evidenza qualcosa che più o meno si sospettava fin dai tempi di Newton: che l'energia si conserva, e non può essere né creata né distrutta. Così, un corpo in moto ha "energia cinetica", espressione introdotta nel 1856 da Lord Kelvin. Un corpo che si muove verso l'alto viene rallentato dalla gravità, quindi la sua energia cinetica scompare gradualmente, ma, mentre esso perde tale energia cinetica, guadagna energia di posizione: infatti, trovandosi in alto rispetto alla superficie della terra, può prima o poi cadere, riacquistando energia cinetica. Nel 1853, il fisico scozzese William John Macquorn Rankine diede a questa energia di posizione il nome di

"energia potenziale". Sembrava che la somma dell'energia cinetica di un corpo e della sua energia potenziale (la sua "energia meccanica") rimanesse costante durante il moto; questa costanza venne chiamata "conservazione dell'energia meccanica". Tuttavia, l'energia meccanica non si conserva "perfettamente": una parte va persa per attrito, resistenza dell'aria, eccetera.

La cosa più importante dimostrata dagli esperimenti di Joule era il fatto che questa conservazione risultava rigorosamente verificata se si teneva conto anche del calore; infatti, quando va persa dell'energia meccanica per attrito o resistenza dell'aria, compare al suo posto del calore. Se si tiene conto anche di tale calore, si può dimostrare in modo incondizionato che non viene creata energia nuova né distrutta energia esistente. Il primo ad asserire chiaramente questo fatto era stato un fisico tedesco, Julius Robert Mayer, nel 1842; tuttavia egli non si appoggiava su un sufficiente lavoro sperimentale, e oltretutto mancava di solide credenziali accademiche. (Anche Joule, che era un birraio e non aveva quindi credenziali accademiche, incontrò delle difficoltà per far pubblicare il proprio lavoro, pur così accurato.)

Fu solo nel 1847 che una figura accademica di sufficiente prestigio espresse questo concetto in modo esplicito. In quell'anno Heinrich von Helmholtz enunciò il "principio di conservazione dell'energia": ogniqualvolta una certa quantità di energia sembra scomparire da qualche parte, deve apparirne una quantità equivalente da qualche altra parte. Questo viene anche chiamato "primo principio della termodinamica" e resta fra i fondamenti della fisica moderna, non messo in crisi né dalla teoria dei quanti né dalla teoria della relatività.

Ora, benché qualsiasi forma di lavoro possa essere convertita interamente in calore, l'inverso non è vero. Quando si converte il calore in lavoro, parte di esso è inutilizzabile, e va inevitabilmente sprecato. In una macchina a vapore in funzione il calore del vapore viene convertito in lavoro solo fintantoché la temperatura del vapore scende fino alla temperatura ambiente; dopo di che, nonostante rimanga ancora molto calore nell'acqua fredda formata dal vapore, non è più possibile convertirlo in lavoro. Anche nell'intervallo di temperatura in cui è possibile ottenere lavoro, parte del calore non si trasforma in lavoro, ma viene speso per riscaldare il motore e l'aria circostante, per superare l'attrito tra il pistone e il cilindro, e così via.

In ogni conversione di energia - per esempio, di energia elettrica in energia luminosa, o di energia magnetica in energia di moto - parte dell'energia va sprecata; non va perduta - il che sarebbe contrario al primo principio - ma viene convertita in calore, che viene dissipato nell'ambiente.

La capacità di un sistema di compiere lavoro è la sua "energia libera". La frazione dell'energia che va inevitabilmente persa come calore non utilizzabile trova espressione quantitativa nel concetto di "entropia" - un termine usato per la prima volta nel 1850 dal fisico tedesco Rudolf Julius Emmanuel Clausius.

Clausius sottolineò il fatto che, in qualsiasi processo che implichi un flusso di energia, vi è sempre una certa perdita; pertanto l'entropia dell'universo cresce in continuazione. Questo aumento costante dell'entropia costituisce il contenuto del "secondo principio della termodinamica"; è a questo proposito che talvolta si parla di «morte termica dell'universo». Fortunatamente la quantità di energia utilizzabile (fornita quasi interamente dalle stelle, che vanno «consumandosi» a un ritmo vertiginoso) è talmente grande che ne resta abbastanza per tutti gli usi ancora per molti miliardi di anni.

IL CALORE E IL MOTO MOLECOLARE.

Una chiara comprensione della natura del calore si ebbe infine allorché si comprese la struttura atomica della materia e ci si rese conto che le molecole che costituiscono un gas sono continuamente in moto, e rimbalzano le une contro le altre nonché contro le pareti del recipiente che le contiene. Il primo che tentò di spiegare in questi termini le proprietà dei gas fu il matematico svizzero Daniel Bernoulli, nel 1738; egli però era troppo in anticipo sui suoi tempi.

A metà del diciannovesimo secolo Maxwell e Boltzmann (vedi capitolo quinto) elaborarono adeguatamente l'aspetto matematico della questione, gettando le basi della "teoria cinetica dei gas («cinetica» deriva dalla parola greca che indica il movimento), che mostrava come il calore fosse equivalente al moto delle molecole. Così la teoria del calorico ricevette il colpo di grazia. Si comprese allora che il calore era un fenomeno vibrazionale, consistente nel movimento delle molecole nei gas e nei liquidi, o nell'oscillazione incessante delle molecole nei solidi.

Quando si riscalda un solido in misura tale che l'oscillazione delle molecole acquista l'energia necessaria per spezzare i legami che tengono unite le molecole contigue, il solido fonde e diventa un liquido. Più è forte il legame tra molecole contigue in un solido, maggiore è la quantità di calore che occorre per farle vibrare con violenza sufficiente a spezzare tale legame; e più alta è pertanto la temperatura di fusione della sostanza.

Nello stato liquido le molecole possono muoversi liberamente l'una rispetto all'altra. Se si riscalda un liquido, i moti delle molecole finiscono per avere energia sufficiente a liberarle completamente, e il liquido bolle. Anche qui, il punto di ebollizione è più alto quando le forze intermolecolari sono più intense.

Quando si converte un solido in un liquido, tutta l'energia termica viene usata per spezzare i legami intermolecolari: è per questo che il calore assorbito per fondere il ghiaccio non fa salire la sua temperatura. Lo stesso accade quando si bolle un liquido.

Ora possiamo distinguere facilmente tra calore e temperatura. Il calore è l'energia totale contenuta nei moti molecolari di una data quantità di materia. La temperatura rappresenta l'energia cinetica media per molecola di una data sostanza. Così, due litri di acqua a 60 gradi C contengono il doppio di calore di un litro di acqua alla stessa temperatura (poiché vi è un numero doppio di molecole in agitazione), ma la temperatura è uguale nei due volumi di acqua, perché l'energia media del moto molecolare è la stessa in entrambi i casi.

Vi è dell'energia nella struttura stessa di un composto chimico - cioè, nelle forze di legame che vincolano un atomo o una molecola agli atomi o alle molecole vicini. Se si rompono questi legami creandone dei nuovi che richiedono minor energia, l'energia in eccesso farà la sua comparsa sotto forma di calore o di luce, o di entrambi. Talvolta l'energia viene liberata così velocemente da dar luogo a un'esplosione.

È possibile calcolare l'energia chimica contenuta in una qualsiasi sostanza e prevedere quale quantità di calore sarà liberata in qualsiasi reazione; per esempio, la combustione del carbone implica la rottura dei legami tra gli atomi di carbonio del carbone stesso e dei legami tra gli atomi delle molecole di ossigeno, con cui si ricombina il carbonio. Ora, l'energia di legame del nuovo composto (anidride carbonica) è inferiore all'energia dei legami delle sostanze di partenza: questa differenza, che può essere misurata, viene liberata sotto forma di calore e di luce.

Nel 1876, il fisico americano Josiah Willard Gibbs elaborò la teoria della "termodinamica chimica", e lo fece così esaurientemente da portare in un sol colpo alla completa maturità questa branca della scienza che praticamente non esisteva.

La lunga memoria in cui Gibbs esponeva le proprie idee era molto al di sopra del livello di comprensione degli altri studiosi americani, e fu pubblicata solo dopo considerevoli esitazioni nelle "Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences". Anche in seguito, le sue serrate argomentazioni matematiche e lo stesso carattere riservato di Gibbs contribuirono a far restare pressoché ignorata tutta la materia, fino a quando, nel 1883, Ostwald ne venne a conoscenza, tradusse la memoria in tedesco e proclamò al mondo intero l'importanza dell'opera di Gibbs.

Un esempio di tale importanza è dato dalle equazioni che esprimono le regole semplici, ma rigorose, che governano l'equilibrio tra sostanze diverse che si trovano presenti in più di una fase (per esempio, in soluzione e sotto forma solida, oppure come due liquidi immiscibili in presenza di un vapore, e così via). La "regola delle fasi" è di vitale importanza per la metallurgia e per molti altri rami della chimica.

MASSA ED ENERGIA.

Con la scoperta della radioattività, avvenuta nel 1896 (vedi capitolo sesto), era sorto un nuovo problema riguardante l'energia. Uranio e torio, due sostanze radioattive, emettevano particelle aventi energie sorprendentemente alte. Inoltre, Marie Curie aveva scoperto che il radio emetteva in continuazione quantità notevoli di calore: un grammo di radio emetteva più di 100 calorie all'ora, e seguitava ad emetterle ora dopo ora, settimana dopo settimana, decennio dopo decennio. La reazione chimica più energetica nota non era in grado di produrre un milionesimo dell'energia liberata dal radio. Ci si trovava forse di fronte a una violazione del principio di conservazione dell'energia?

Non meno sorprendente era il fatto che questa produzione di energia, a differenza di quanto accade nelle reazioni chimiche, non dipendeva dalla temperatura, ma procedeva alle temperature più basse, come quella dell'idrogeno liquido, esattamente come alle temperature ordinarie.

Era chiaro che qui entrava in gioco una forma del tutto nuova di energia, completamente diversa da quella chimica. Fortunatamente i fisici non dovettero aspettare molto per la soluzione del mistero.

Ancora una volta essa fu fornita da Einstein, con la teoria della relatività ristretta, nella quale si mostrava in forma matematica come la massa possa essere considerata una forma di energia - una forma molto concentrata: infatti, una piccola quantità di massa può convertirsi in una quantità immensa di energia.

L'equazione di Einstein che mette in relazione massa ed energia è ormai una delle più famose in assoluto. Eccola:

e = m c al quadrato

Qui "e" rappresenta l'energia (in "erg"), "m" la massa (in grammi) e "c" la velocità della luce (in centimetri al secondo). Si possono usare anche altre unità di misura senza mutare sostanzialmente il risultato.

Dato che la velocità della luce è di 30 miliardi di centimetri al secondo, il valore di c al quadrato è pari a 900 miliardi di miliardi, o, in altri termini, la conversione di 1 grammo di massa in energia produce 900 miliardi di miliardi di erg. L'"erg" è una piccola quantità di energia, difficilmente rapportabile alle esperienze della vita quotidiana, ma possiamo farci un'idea di cosa significhi questo numero pensando che l'energia di 1 grammo di massa sarebbe sufficiente per alimentare una lampadina elettrica da 1000 watt per 2850 anni.

Detto in altri termini, la completa conversione in energia di 1 grammo di massa equivarrebbe alla combustione di quasi 2000 tonnellate di benzina.

L'equazione di Einstein distruggeva una delle «sacre» leggi di conservazione. La legge di conservazione della massa di Lavoisier aveva stabilito che la materia non si può né creare né distruggere. In realtà, in ogni reazione chimica che libera energia, una piccola quantità di massa si trasforma in energia: se si potessero pesare con estrema precisione i prodotti della reazione, si troverebbe che il loro peso non è esattamente uguale a quello della materia di partenza.

Ma la perdita di massa nelle ordinarie reazioni chimiche è talmente piccola che nessuna tecnica a disposizione dei chimici del diciannovesimo secolo avrebbe mai potuto rivelarla. A questo punto, invece, i fisici si trovavano di fronte a un fenomeno del tutto diverso: la reazione nucleare che produce la radioattività, anziché la reazione chimica di combustione del carbone. Le reazioni nucleari liberano tanta energia che è possibile misurare il difetto di massa.

Postulando la convertibilità reciproca di massa ed energia, Einstein fuse in un'unica legge le due precedenti, quella di conservazione della massa e quella di conservazione dell'energia, ottenendo la "legge di conservazione della massa-energia". Il primo principio della termodinamica, ben lungi dall'essere stato scosso, aveva conquistato una posizione ancora più inattaccabile.

La conversione della massa in energia venne confermata sperimentalmente da Aston con lo spettrografo di massa, che poteva misurare la massa dei nuclei atomici con grande precisione in base alla loro deflessione per effetto di un campo magnetico. Nel 1925, Aston fece uso di uno strumento ulteriormente perfezionato per mostrare che le masse dei vari nuclei non sono esattamente multiple delle masse dei neutroni e dei protoni che li compongono.

Soffermiamoci per un momento sulle masse di questi neutroni e protoni.

Per un secolo, le masse degli atomi e delle particelle subatomiche in generale erano state misurate ponendo, per convenzione, il peso atomico dell'ossigeno uguale esattamente a 16,00000 (vedi capitolo sesto). Nel 1929, però, Giauque dimostrò che l'ossigeno è costituito da tre isotopi ossigeno 16, ossigeno 17 e ossigeno 18 - e che il peso atomico dell'ossigeno è la media ponderata dei numeri di massa di questi tre isotopi.

Certamente, l'ossigeno 16 è di gran lunga il più comune dei tre, dato che costituisce il 99,759 per cento di tutti gli atomi di ossigeno.

Così, se il peso atomico complessivo dell'ossigeno è 16,00000, l'isotopo ossigeno 16 ha un numero di massa che è "quasi" uguale a 16. (Sono le masse delle piccole quantità di ossigeno 17 e ossigeno 18 a portare a 16 tale valore.) I chimici, per una generazione dopo tale scoperta, non trovarono niente di inquietante in questo fatto, anzi mantennero il vecchio valore di riferimento per quelli che furono poi chiamati i "pesi atomici chimici".

Ma i fisici reagirono in modo diverso. Essi preferirono porre la massa dell'isotopo ossigeno 16 esattamente pari a 16,00000 e determinare su tale base tutte le altre masse, stabilendo così i "pesi atomici fisici". Ponendo l'ossigeno 16 pari a 16 unità di massa, il peso atomico dell'ossigeno naturale, con le sue tracce di isotopi più pesanti, diventa 16,0044. In generale, i pesi atomici fisici di tutti gli elementi sono superiori dello 0,027 per cento ai corrispondenti pesi atomici chimici.

Nel 1961, i fisici e i chimici raggiunsero un compromesso, stabilendo per convenzione di determinare i pesi atomici ponendo la massa dell'isotopo carbonio 12 pari a 12,00000; in tal modo la base dei pesi atomici era un numero di massa caratteristico, ed essi erano fondati nel modo più solido possibile. In più, questa base rendeva i pesi atomici quasi esattamente uguali a quelli del vecchio sistema. Così, ponendo il carbonio 12 pari a 12 unità di massa, il peso atomico dell'ossigeno diventava 15,9994.

Bene, cominciamo allora dall'atomo del carbonio 12, con la sua massa uguale a 12,00000: il suo nucleo contiene 6 protoni e 6 neutroni. Da misurazioni fatte con lo spettrografo di massa risulta evidente che la massa del protone (nel sistema basato sul carbonio 12) è 1,007825 e quella del neutrone 1,008665. Sei protoni, quindi, dovrebbero avere massa 6,046950 e sei neutroni 6,051990; insieme, i dodici nucleoni dovrebbero avere una massa pari a 12,098940. Ma la massa del carbonio 12 è 12,00000. Cosa è accaduto del mancante 0,098940?

Questa massa che scompare è il "difetto di massa". Il difetto di massa diviso per il numero di massa dà il difetto di massa per nucleone, o "frazione di impacchettamento". La massa non è realmente scomparsa, ma si è convertita in energia, secondo l'equazione di Einstein; il difetto di massa rappresenta quindi anche l'"energia di legame del nucleo". Per scindere un nucleo nei singoli protoni e neutroni occorre una quantità di energia uguale all'energia di legame, dato che si deve formare una quantità di massa equivalente a tale energia.

Aston determinò la frazione di impacchettamento di molti nuclei e trovò che essa aumentava piuttosto rapidamente procedendo dall'idrogeno fino agli elementi vicini al ferro, per poi ridiscendere, piuttosto lentamente, per il resto della tavola periodica. In altri termini, l'energia di legame per nucleone è più elevata per gli elementi centrali della tavola periodica. Pertanto, la conversione di un elemento situato a uno degli estremi della tavola in un altro elemento più vicino al suo centro doveva liberare energia.

Esaminiamo l'esempio dell'uranio 238. Questo nucleo decade attraverso una serie di disintegrazioni fino a diventare piombo 206. Durante tale processo emette otto particelle alfa. (Emette anche particelle beta, ma queste sono talmente leggere che si possono trascurare.) Ora la

massa del piombo 206 è 205,9745 e quella delle otto particelle alfa ammonta complessivamente a 32,0208; insieme tutti i prodotti della disintegrazione hanno una massa pari a 237,9953. Ma la massa dell'uranio 238, da cui provengono, è 238,0506. La differenza, o perdita di massa, è 0,0553. Tale perdita di massa è sufficiente a spiegare l'energia liberata nei successivi decadimenti dell'uranio.

Quando l'uranio si disintegra dando origine ad atomi ancora più piccoli, come accade nella fissione, viene liberata molta più energia.

E quando l'idrogeno viene convertito in elio, come accade nelle stelle, vi è la perdita di una frazione della massa ancora superiore, e, in corrispondenza, uno sviluppo di energia più abbondante.

I fisici cominciarono a concepire l'equivalenza massa-energia come una sorta di partita doppia molto rigorosa. Per esempio, quando nel 1934 fu scoperto il positrone, la sua annichilazione con un elettrone produsse una coppia di raggi gamma, la cui energia era esattamente uguale alla massa delle due particelle. Inoltre, come mostrò per primo Blackett, si poteva creare della massa partendo da una quantità adeguata di energia. Un raggio gamma di energia appropriata, in certe circostanze, spariva originando una "coppia elettrone-positrone".

Quantità maggiori di energia, fornite dalle particelle dei raggi cosmici o da quelle accelerate dai protosincrotroni (vedi capitolo settimo), potevano effettuare la creazione di particelle di massa maggiore, come mesoni e antiprotoni.

Non desta quindi meraviglia il fatto che i fisici, non tornando i conti della partita doppia, come nel caso dell'emissione di particelle beta aventi energia inferiore a quella prevista, abbiano inventato il neutrino per far quadrare i conti, piuttosto che modificare l'equazione di Einstein (vedi capitolo settimo).

Un'ulteriore dimostrazione (se ce ne fosse stato bisogno) della conversione della massa in energia la diedero in modo più che convincente le bombe nucleari.

ONDE E PARTICELLE.

Negli anni venti il dualismo regnava sovrano nella fisica. Planck aveva dimostrato che la radiazione ha un aspetto corpuscolare oltre a quello ondulatorio. Einstein aveva a sua volta dimostrato che massa ed energia sono come due facce della stessa medaglia, e che spazio e tempo sono inseparabili. I fisici cominciarono ad andare in cerca di altri dualismi.

Nel 1923, il fisico francese Louis Victor de Broglie riuscì a dimostrare che, proprio come la radiazione presentava caratteristiche corpuscolari, così le particelle materiali, per esempio gli elettroni, potevano presentare caratteristiche ondulatorie. Le onde associate alle particelle, secondo le sue previsioni, dovevano avere una lunghezza d'onda inversamente proporzionale al prodotto della massa per la velocità (cioè alla "quantità di moto") della particella. La lunghezza d'onda associata agli elettroni di modesta velocità doveva trovarsi, secondo i calcoli di de Broglie, nella regione dei raggi X.

Nel 1927, anche questa sorprendente previsione trovò conferma. Clinton Joseph Davisson e Lester Halbert Germer dei Bell Telephone Laboratories erano impegnati a bombardare del nichel metallico con elettroni; in conseguenza di un incidente sperimentale che aveva reso necessario riscaldare il nichel molto a lungo, il metallo si trovava sotto forma di grandi cristalli, che erano l'ideale per studiare la diffrazione, poiché la distanza tra gli atomi di un cristallo è dello stesso ordine di grandezza delle cortissime lunghezze d'onda degli elettroni. Infatti gli elettroni, attraversando questi cristalli, non si comportarono come particelle, ma come onde. La pellicola collocata dietro al nichel presentava delle figure d'interferenza, cioè delle frange alternate chiare e scure, proprio come se ad attraversare il nichel fossero stati dei raggi X e non degli elettroni.

Le figure d'interferenza erano state proprio il mezzo usato da Young più di un secolo prima per dimostrare la natura ondulatoria della luce; ora dimostravano la natura ondulatoria degli

elettroni. Dalle misurazioni delle frange d'interferenza fu possibile calcolare la lunghezza d'onda associata all'elettrone, che risultò pari a 1,65 Å (unità angstrom), quasi esattamente quella che avrebbe dovuto essere secondo i calcoli di de Broglie.

Nello stesso anno, anche il fisico inglese George Paget Thomson, lavorando indipendentemente e usando metodi diversi, dimostrò che gli elettroni hanno proprietà ondulatorie.

De Broglie ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1929, mentre Davisson e Thomson condivisero quello del 1937.

MICROSCOPIA ELETTRONICA.

Questa scoperta totalmente inattesa di un nuovo tipo di dualismo fu quasi subito utilizzata nell'ambito della microscopia. I microscopi ottici ordinari, come ho già ricordato, cessano di essere utili a un dato punto, perché esiste un limite alle dimensioni degli oggetti di cui le onde luminose possono dare un'immagine nettamente definita. Via via che gli oggetti sono più piccoli, si ottengono immagini più confuse, perché le onde luminose riescono ad aggirarli - un fenomeno segnalato per la prima volta dal fisico tedesco Ernst Karl Abbe nel 1878. Il rimedio consiste naturalmente nel cercare di utilizzare lunghezze d'onda minori, capaci di dare una buona risoluzione anche con oggetti più piccoli. I normali microscopi ottici sono in grado di distinguere due punti distanti 1 su 5000 di millimetro, mentre i microscopi a luce ultravioletta possono arrivare a risolvere punti distanti 1 su 10 mila di millimetro. I raggi X darebbero risultati ancora migliori, ma per essi non esistono lenti. È possibile risolvere questo problema, tuttavia, usando le onde associate agli elettroni, che hanno all'incirca la stessa lunghezza d'onda dei raggi X, ma sono più facili da maneggiare. Soprattutto, un campo magnetico può deflettere i raggi elettronici, perché le onde sono associate a una particella carica.

Esattamente come l'occhio può vedere l'immagine ingrandita di un oggetto se si fanno passare i raggi luminosi attraverso lenti adatte, così una lastra fotografica può registrare un'immagine ingrandita di un oggetto, se le onde associate agli elettroni vengono trattate appropriatamente con dei campi magnetici. Dato poi che le lunghezze d'onda associate agli elettroni sono assai più corte di quelle della luce ordinaria, la risoluzione che si può ottenere con un "microscopio elettronico" a elevato ingrandimento è molto superiore a quella ottenibile con un microscopio ordinario.

Un rudimentale microscopio elettronico, capace di 400 ingrandimenti, venne realizzato in Germania nel 1932 da Ernst Ruska e Max Knoll, ma il primo strumento utilizzabile fu costruito nel 1937 all'Università di Toronto da James Hillier e Albert F. Prebus. Il loro apparecchio poteva ingrandire un oggetto 7000 volte, mentre i migliori microscopi ottici superano i 2000 ingrandimenti circa. Nel 1939, i microscopi elettronici erano ormai in commercio; infine Hillier e altri svilupparono microscopi elettronici capaci di ingrandire fino a 2 milioni di volte.

Mentre un microscopio elettronico ordinario focalizza gli elettroni sul bersaglio facendoglieli passare attraverso, in un altro tipo di microscopio il fascio di elettroni si limita a sfiorare rapidamente il bersaglio, eseguendone la scansione un po' come fa il pennello elettronico nel cinescopio di un apparecchio televisivo. L'idea del "microscopio elettronico a scansione" era già stata suggerita nel 1938 da Knoll, ma la sua realizzazione pratica avvenne solo attorno al 1970 ad opera del fisico angloamericano Albert Victor Crewe. Il microscopio elettronico a scansione danneggia meno l'oggetto da esaminare, conferisce agli oggetti un maggiore rilievo tridimensionale, fornendo quindi più informazioni, e può perfino mostrare la posizione di singoli atomi di grandi dimensioni.

GLI ELETTRONI COME ONDE.

Non dovrebbe sorprendere il fatto che il dualismo onda-particella valga anche inversamente, cioè che fenomeni solitamente considerati di natura ondulatoria possano presentare anche proprietà tipiche delle particelle. Già Planck ed Einstein avevano mostrato che la radiazione è fatta di quanti, i quali sono, in un certo senso, delle particelle.

Nel 1923, Compton, il fisico che aveva dimostrato che i raggi cosmici sono costituiti da particelle (vedi capitolo settimo), mostrò che i quanti di radiazione presentavano alcune concrete proprietà delle particelle. Egli infatti verificò che i raggi X, quando vengono diffusi dalla materia, perdono energia, aumentando la loro lunghezza d'onda. Questo effetto è appunto quanto c'è da aspettarsi da una «particella» di radiazione che urti una particella di materia: la particella materiale viene spinta in avanti e acquista energia, mentre il raggio X cambia direzione e perde energia. È questo l'"effetto Compton", che contribuì a stabilire l'esistenza del dualismo onda-particella.

L'esistenza di onde associate alla materia ebbe anche conseguenze teoriche importanti, aiutando a sciogliere alcuni enigmi relativi alla struttura dell'atomo.

Nel 1913, Niels Bohr aveva descritto l'atomo di idrogeno, alla luce della nuova teoria dei quanti, come formato da un nucleo centrale intorno a cui un elettrone poteva girare in una qualsiasi fra molte orbite. Queste orbite si trovano in posizioni fisse; se un elettrone scende da un'orbita più esterna su una più interna, perde energia, emettendola sotto forma di un quanto di lunghezza d'onda definita. Per passare da un'orbita più interna a una più esterna, un elettrone dovrebbe assorbire un quanto, che abbia però energia e lunghezza d'onda definite, cioè proprio quelle capaci di farlo spostare nella misura voluta. Per questo l'idrogeno può assorbire o emettere solo radiazione di certe lunghezze d'onda e il suo spettro è contraddistinto da righe caratteristiche. Il modello proposto da Bohr, che nel decennio successivo era stato reso gradualmente più complesso, soprattutto ad opera del fisico tedesco Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld, che aveva introdotto anche orbite ellittiche, riusciva a spiegare assai bene molti fatti relativi agli spettri dei vari elementi. Per la sua teoria Bohr ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1922. I fisici tedeschi James Franck e Gustav Ludwig Hertz (quest'ultimo un nipote di Heinrich Hertz), i cui studi sulle collisioni tra atomi e elettroni avevano fornito una base sperimentale alla teoria di Bohr, condivisero il premio Nobel per la fisica del 1925.

Bohr non era però in grado di spiegare perché le orbite avessero proprio quelle determinate posizioni obbligate. Egli non aveva fatto altro che scegliere le orbite che davano i risultati corretti per quanto riguardava l'assorbimento e l'emissione, cioè che portavano alle lunghezze d'onda effettivamente osservate.

Nel 1926, il fisico tedesco Erwin Schrödinger decise di riconsiderare la struttura dell'atomo alla luce della teoria di de Broglie sulla natura ondulatoria delle particelle. Considerando l'elettrone come un'onda, arrivò alla conclusione che l'elettrone non gira intorno al nucleo come un pianeta gira intorno al sole, ma costituisce un'onda che si incurva tutto intorno al nucleo, in modo da essere, per così dire, allo stesso tempo in tutte le parti della propria orbita.

Risultò che, in base alla lunghezza d'onda prevista per l'elettrone da de Broglie, nelle orbite indicate da Bohr entrava esattamente un numero intero di onde elettroniche. Su orbite diverse da quelle di Bohr le onde non sarebbero state un numero intero di volte, ma sarebbero risultate "sfasate"; pertanto tali orbite non avrebbero potuto essere stabili.

Schrödinger elaborò una descrizione matematica dell'atomo, che fu chiamata "meccanica ondulatoria" o "meccanica quantistica"; essa si dimostrò un modo di concepire l'atomo più soddisfacente di quanto non fosse il sistema di Bohr. Schrödinger condivise il premio Nobel del 1933 con Dirac, l'ideatore della teoria delle antiparticelle (vedi capitolo settimo), che aveva anch'egli contribuito allo sviluppo di questa nuova descrizione dell'atomo. Il fisico tedesco Max Born, che diede ulteriori contributi allo sviluppo matematico della meccanica quantistica, ricevette (insieme ad altri) il premio Nobel per la fisica nel 1954.

IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE.

Nel frattempo l'elettrone era diventato una «particella» piuttosto indefinita - e le cose in seguito non fecero che peggiorare. Werner Heisenberg, in Germania, sollevò un problema profondo, che proiettava le particelle, anzi la stessa fisica, quasi nel regno dell'inconoscibile.

Heisenberg aveva proposto un suo modello dell'atomo, in cui abbandonava ogni tentativo di descriverlo come composto di particelle o di onde. Egli era giunto alla conclusione che ogni tentativo di tracciare un'analogia tra la struttura atomica e la struttura del mondo che ci circonda fosse destinato a fallire; invece descrisse i livelli di energia, o orbite degli elettroni, in termini puramente numerici, rinunciando a qualsiasi immagine intuitiva. Poiché a questo scopo era ricorso a uno strumento matematico chiamato "matrice", la sua teoria venne chiamata "meccanica delle matrici".

Heisenberg ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1932 per i suoi contributi alla meccanica quantistica, ma la sua meccanica delle matrici ebbe meno diffusione presso i fisici della meccanica ondulatoria di Schrödinger, perché quest'ultima sembrava altrettanto utile quanto le astrazioni di Heisenberg, e perfino per i fisici è difficile abbandonare il tentativo di descrivere con immagini ciò di cui stanno parlando.

Nel 1944 sembrò che i fisici avessero fatto la scelta giusta, perché il matematico americano di origine ungherese John von Neumann espose degli argomenti che sembravano dimostrare che la meccanica delle matrici e la meccanica ondulatoria sono equivalenti dal punto di vista matematico: qualsiasi cosa sia dimostrata dall'una può essere dimostrata anche dall'altra. Allora perché non scegliere la versione meno astratta?

Dopo aver introdotto la meccanica delle matrici (facciamo un salto indietro nel tempo), Heisenberg passò a considerare il problema di descrivere la posizione di una particella. Come si può determinare dove si trova una particella? La risposta ovvia è: guardandola. Bene, immaginiamo un microscopio che renda visibile un elettrone: per vederlo, dobbiamo inviare su di esso un raggio luminoso, o un qualche tipo appropriato di radiazione; ma un elettrone è talmente piccolo che un singolo fotone che lo colpisse lo farebbe spostare, cambiando la sua posizione. Nell'atto stesso di misurare la sua posizione, noi l'avremmo cambiata.

Si tratta di un fenomeno che avviene anche nella vita ordinaria.

Quando misuriamo la pressione di un pneumatico con un manometro, facciamo uscire un po' d'aria, modificando leggermente la pressione nell'atto stesso in cui la misuriamo. Analogamente, quando poniamo un termometro in una vasca da bagno di acqua calda per misurarne la temperatura, esso assorbe del calore e pertanto modifica, sia pure di poco, la temperatura. Uno strumento che misura la corrente elettrica sottrae un po' di corrente per spostare l'indice sul quadrante. Lo stesso accade in qualsiasi misurazione che facciamo.

Tuttavia, in tutte le misure ordinarie, l'alterazione prodotta in ciò che stiamo misurando è così piccola che possiamo trascurarla. Ma quando vogliamo osservare un elettrone, la situazione è del tutto diversa. Ora il nostro strumento di misura ha dimensioni come minimo uguali a quelle dell'oggetto che stiamo misurando; non esiste, infatti, un'entità utilizzabile per la misura che sia più piccola dell'elettrone. Di conseguenza, la nostra misurazione deve inevitabilmente avere sull'oggetto misurato un effetto che non è più trascurabile, ma anzi è decisivo. Potremmo fermare l'elettrone, determinandone così la posizione in un dato istante; in tal caso, però, non potremmo conoscere il suo moto, ossia la sua velocità.

Oppure, potremmo misurare la velocità, ma allora non saremmo più in grado di stabilire la posizione dell'elettrone in un momento dato. Heisenberg dimostrò che non è possibile trovare un metodo per determinare rigorosamente la posizione di una particella subatomica senza che resti una totale incertezza sul suo moto. Reciprocamente, non è possibile determinare con precisione il moto di una particella senza che resti una notevole incertezza sulla sua posizione. Calcolare entrambe esattamente, nello stesso istante, è impossibile.

Se Heisenberg aveva ragione, allora anche allo zero assoluto non poteva esserci assenza totale di energia. Se l'energia scendesse a zero e le particelle restassero completamente prive di moto, resterebbe da determinare solo la posizione, dato che la velocità potrebbe essere considerata pari a zero. È quindi prevedibile che debba sussistere una "energia di punto zero", che mantenga le particelle in moto e, per così dire, «incerte», anche allo zero assoluto. È questa ineliminabile energia di punto zero a mantenere liquido l'elio anche allo zero assoluto (vedi capitolo sesto).

Nel 1930, Einstein dimostrò che il principio di indeterminazione, che stabiliva l'impossibilità di ridurre l'incertezza della posizione senza aumentare quella della quantità di moto, implicava anche l'impossibilità di ridurre l'incertezza nella misura dell'energia senza aumentare l'incertezza circa l'istante in cui avviene la misurazione. Einstein pensava di poter usare questa idea come una leva per confutare il principio di indeterminazione, ma Bohr dimostrò che il tentativo di Einstein era sbagliato.

In realtà la versione del principio di indeterminazione data da Einstein si dimostrò molto utile, perché significava che nei processi subatomici la legge di conservazione dell'energia può essere violata per tempi brevissimi, purché il bilancio energetico venga riportato in pareggio alla fine di questi periodi: quanto maggiore è lo scarto dalla conservazione, tanto minore è l'intervallo di tempo consentito. (Yukawa usò questo concetto per elaborare la sua teoria dei pioni; vedi capitolo settimo.) Era anche possibile spiegare alcuni fenomeni subatomici, assumendo che, a volte, le particelle vengano prodotte dal nulla (sfidando così la legge di conservazione), ma che esse cessino di esistere prima del tempo necessario perché siano rivelate; si tratterebbe dunque di "particelle virtuali". La teoria delle particelle virtuali venne elaborata alla fine degli anni quaranta da tre persone: i fisici americani Julian Schwinger e Richard Phillips Feynman e il fisico giapponese Sin-itiro Tomonaga, ai quali andò il premio Nobel per la fisica del 1965.

Dopo il 1976 è stata avanzata la congettura che l'universo abbia avuto inizio sotto forma di una minuscola particella virtuale, di grande massa, che avrebbe subìto un'espansione estremamente rapida senza scomparire. Secondo questa ipotesi, l'universo si sarebbe formato dal nulla e possiamo anche chiederci se non esista un numero infinito di universi che si formano (e hanno poi fine) in un volume infinito di nulla.

Il principio di indeterminazione ha avuto una profonda influenza sul pensiero dei fisici e dei filosofi; esso ha un rapporto diretto con il problema filosofico della causalità (cioè con la relazione tra causa ed effetto). Le sue implicazioni per la scienza, però, non sono quelle credute comunemente. Capita spesso di leggere che il principio di indeterminazione toglie qualsiasi certezza circa la natura e mostra che la scienza, dopo tutto, non sa e non potrà mai sapere cosa accade realmente, che il sapere scientifico è alla mercé dei capricci imprevedibili di un universo in cui l'effetto non necessariamente segue la causa. Sia o no valida tale interpretazione dal punto di vista della filosofia, il principio di indeterminazione non ha in alcun modo mutato l'atteggiamento degli scienziati verso la ricerca scientifica. Anche se, per esempio, il comportamento delle singole molecole in un gas non può essere previsto con certezza, ciononostante le molecole, in media, obbediscono a certe leggi e si può prevedere il loro comportamento su basi statistiche, esattamente come le compagnie di assicurazioni possono calcolare delle tabelle di mortalità affidabili anche se è impossibile prevedere quando morirà un dato individuo in particolare.

Anzi, nella maggior parte delle osservazioni scientifiche, l'indeterminazione è così piccola in confronto all'ordine di grandezza delle misure implicate che la si può trascurare a tutti gli effetti pratici. Si possono determinare simultaneamente tanto la posizione quanto la velocità di una stella, di un pianeta, di una palla da biliardo, o anche di un granello di sabbia, con precisione del tutto soddisfacente.

Quanto all'indeterminazione tra le stesse particelle subatomiche, è qualcosa che non ostacola, ma anzi aiuta, i fisici. Essa è stata usata per spiegare alcuni aspetti della radioattività e dell'assorbimento delle particelle subatomiche da parte del nucleo, come pure molti altri eventi

subatomici, più ragionevolmente di quanto sarebbe stato possibile senza il principio di indeterminazione.

Il principio di indeterminazione significa che l'universo è più complesso di quanto non si pensasse, ma non che esso è irrazionale.

Capitolo 9.
LA MACCHINA.

FUOCO E VAPORE.

Fin qui mi sono occupato quasi esclusivamente della scienza "pura", cioè della scienza come spiegazione dell'universo che ci circonda.

Durante tutto il corso della storia, però, gli esseri umani hanno utilizzato le forze della natura per accrescere la propria sicurezza, il proprio benessere e il proprio piacere. Dapprima si avvalsero dei processi naturali senza comprendere le leggi che li governano, ma gradualmente arrivarono a dominarli, e ciò attraverso l'osservazione attenta, il buon senso e il ricorso al «metodo del tentativo e dell'errore». Questa utilizzazione della natura per fini umani costituisce la "tecnologia", e precede la scienza.

L'inizio del grande sviluppo della scienza, tuttavia, rese possibile una continua accelerazione del progresso della tecnologia. Nei tempi moderni la scienza e la tecnologia sono cresciute talmente intrecciate (la scienza facendo progredire la tecnologia grazie alla miglior conoscenza delle leggi naturali, e la tecnologia facendo progredire la scienza con il mettere a disposizione degli scienziati sempre nuovi strumenti e apparecchi), che non è più possibile separarle.

TECNOLOGIA PRIMITIVA.

Se risaliamo alle origini, dobbiamo ricordare che, anche se il primo principio della termodinamica dice che l'energia non può essere creata dal nulla, non vi è però alcuna legge che vieti di trasformare una forma di energia in un'altra. Tutta la nostra civiltà è stata costruita sull'individuazione di nuove fonti di energia e sul loro sfruttamento sempre più efficiente e sofisticato. In effetti, la scoperta che da sola ha più inciso sulla storia umana è stata quella della possibilità di convertire l'energia chimica di un combustibile, come il legno, in calore e luce.

Fu forse mezzo milione di anni fa che i nostri antenati ominidi «scoprirono» il fuoco; ciò avveniva assai prima che comparisse l'"Homo sapiens", cioè l'uomo moderno. Certamente anche prima di allora gli ominidi si erano imbattuti in incendi di boscaglie e foreste appiccati dai fulmini, e probabilmente si erano dati alla fuga. Ma la scoperta delle virtù del fuoco venne solo quando la curiosità divenne più forte della paura.

Deve esserci stato un momento in cui un essere primitivo - forse una donna, o più probabilmente un bambino - fu attratto dai residui in lenta combustione di uno di questi incendi e cominciò a divertirsi giocando con le braci, alimentandole con qualche ramoscello e osservando i guizzi delle fiamme. Senza dubbio qualche adulto sarà intervenuto a por fine al gioco pericoloso, finché un giorno qualcuno, dotato di maggior immaginazione, deve aver compreso quali vantaggi si potevano avere domando il fuoco e trasformando un gioco infantile in un'attività utile agli adulti. La fiamma poteva illuminare l'oscurità e riscaldare. Poteva tener lontani i predatori; infine qualcuno deve aver scoperto che il suo calore rendeva più tenero il cibo e ne migliorava il sapore. (Il calore,

inoltre, uccide i microbi e i parassiti presenti nel cibo, cosa che però rimase certamente ignota all'uomo preistorico.)

Per centinaia di migliaia di anni, gli esseri umani, per usare il fuoco, furono costretti a tenerlo acceso permanentemente. Se esso si spegneva accidentalmente (qualcosa di simile ai blackout dei nostri tempi), si era costretti a recarsi da un'altra tribù per procurarselo, o ad attendere che un fulmine incendiasse la foresta. È stato solo in tempi relativamente recenti che gli esseri umani hanno imparato ad accendere il fuoco a piacimento; solo allora il fuoco fu veramente «addomesticato». Fu l'"Homo sapiens" a compiere questa impresa; ciò avveniva in epoca preistorica, ma esattamente quando, esattamente dove ed esattamente come non lo sappiamo e non lo sapremo forse mai.

Con l'inizio della civilizzazione il fuoco fu usato, oltre che per illuminare, riscaldare, cuocere e fornire protezione, anche per ricavare i metalli dai minerali in cui erano contenuti e poi per lavorarli, per cuocere vasellame e mattoni e talora per fabbricare il vetro.

Altri importanti sviluppi segnarono la nascita della civiltà. Verso il 9000 avanti Cristo gli esseri umani cominciarono a coltivare piante e addomesticare animali: nacquero così l'agricoltura e la pastorizia, che accrebbero le risorse alimentari e fornirono la fonte diretta di energia costituita dagli animali. I buoi, gli asini, i cammelli e alla fine anche i cavalli (per non parlare delle renne, degli yak, dei bufali indiani, dei lama e degli elefanti, utilizzati nei più svariati angoli del globo) potevano, con la loro forte muscolatura, sbrigare i lavori essenziali, nutrendosi di alimenti troppo grossolani per gli uomini.

In un'epoca imprecisata, verso il 3500 avanti Cristo, fu inventata la ruota (forse, all'inizio, una ruota da vasaio per foggiare il vasellame); nel giro di qualche secolo, certo entro il 3000 avanti Cristo, si applicarono le ruote alle slitte, il che consentì di far rotolare i carichi, anziché trascinarli. La ruota, pur non essendo essa stessa una fonte diretta di energia, rese possibile un risparmio energetico attraverso la riduzione dell'attrito.

All'incirca nella stessa epoca si cominciarono a usare primitive zattere e piroghe, che consentivano di utilizzare l'energia della corrente dei fiumi per il trasporto di carichi. Forse attorno al 2000 avanti Cristo si cominciarono a usare le vele per sfruttare il vento; in tal modo i moti naturali dell'aria potevano rendere più rapido il trasporto, o addirittura consentire di andare contro corrente (se questa non era troppo forte). Nel 1000 avanti Cristo i fenici solcavano in lungo e in largo con le loro navi il mare Mediterraneo.

Attorno al 50 avanti Cristo, i romani cominciarono a far uso delle ruote idrauliche. Una corrente veloce faceva girare una ruota, e questa a sua volta ne metteva in rotazione altre, che potevano effettuare dei lavori, come macinare, frantumare minerali, pompare acqua, e così via. Sempre in quell'epoca cominciarono a entrare nell'uso i mulini a vento, che utilizzavano l'aria, anziché l'acqua, per far girare la ruota. (Mentre una corrente veloce non si trova facilmente, il vento è presente quasi ovunque.) Nel Medioevo i mulini a vento erano un'importante fonte di energia nell'Europa occidentale; fu ancora nel Medioevo che si cominciò a bruciare nelle fornaci metallurgiche la pietra nera chiamata carbone, a utilizzare l'energia magnetica nella bussola per la navigazione (il che contribuì poi a rendere possibili i grandi viaggi di esplorazione) e a usare l'energia chimica a fini bellici.

Il primo impiego distruttivo dell'energia chimica (a parte la tecnica assai semplice delle frecce incendiarie) sembra essersi verificato all'incirca nel 670 dopo Cristo, quando un alchimista siriaco, Callinico, avrebbe inventato il "fuoco greco", una rudimentale bomba incendiaria composta di zolfo e nafta; si dice che fu essa a salvare Costantinopoli dal primo assedio dei musulmani, nel 673. La polvere da sparo fece la sua comparsa in Europa nel tredicesimo secolo: Ruggero Bacone la descrisse verso il 1280, ma in Asia era già nota da secoli; forse erano stati proprio gli invasori mongoli a introdurla in Europa, dopo il 1240. Comunque, l'uso della polvere da sparo per l'artiglieria iniziò in Europa nel quattordicesimo secolo, e si pensa che i cannoni abbiano fatto la loro comparsa per la prima volta alla battaglia di Crécy, nel 1346.

Tra tutte le invenzioni del Medioevo, la più importante è quella attribuita al tedesco Johann Gutenberg. Verso il 1450, questi introdusse i caratteri mobili da stampa, che dovevano diventare una potente forza innovatrice della società umana. Gutenberg inventò anche l'inchiostro da stampa, realizzando una sospensione di nerofumo in olio di lino anziché in acqua, come si faceva prima. Insieme alla sostituzione della pergamena con la carta (che, secondo la tradizione, era stata inventata da un eunuco cinese, Ts'ai Lun, verso il 50 dopo Cristo, e aveva raggiunto l'Europa, portata dagli arabi, nel tredicesimo secolo), queste invenzioni consentirono la produzione e la diffusione su vasta scala dei libri e di altri materiali scritti.

Nessun'altra invenzione, prima dell'epoca moderna, si diffuse così rapidamente: nel giro di una generazione, furono stampati qualcosa come 40 mila libri.

Il sapere umano non era più sepolto nelle raccolte di manoscritti presso le corti, ma diventava accessibile nelle biblioteche, a disposizione di tutti coloro che sapevano leggere. La carta stampata cominciò a creare l'opinione pubblica e a permetterle di esprimersi. (L'esistenza della stampa fu un fattore decisivo per il successo della ribellione del 1517 di Martin Lutero contro il papato, ribellione che altrimenti non sarebbe forse andata al di là di una polemica personale tra monaci.) E fu ancora la stampa a creare una delle condizioni essenziali perché la scienza diventasse come oggi la conosciamo.

Questa condizione indispensabile è la comunicazione delle idee su vasta scala. Prima dell'invenzione della stampa la scienza era consistita in comunicazioni personali tra pochi appassionati del sapere; ora diventava uno dei più importanti campi dell'attività umana, destinato ad arruolare nelle proprie file un numero crescente di ricercatori, fino a formare una "comunità scientifica" mondiale; la diffusione consentita dalla stampa stimolava inoltre la verifica pronta e critica delle teorie e apriva incessantemente nuove frontiere.

LA MACCHINA A VAPORE.

La svolta decisiva nell'utilizzazione dell'energia si verificò alla fine del diciassettesimo secolo, anche se nell'antichità c'erano stati alcuni precedenti di minor importanza. L'inventore greco Erone di Alessandria, vissuto durante i primi secoli della nostra era (non siamo in grado di precisare con sicurezza neppure il secolo), aveva costruito diversi congegni azionati dal vapore. Egli utilizzò la spinta esercitata dall'espansione del vapore per far spalancare le porte dei templi, per far girare delle sfere e così via. Ma il mondo antico, ormai in declino, non fu in grado di sfruttare queste precoci invenzioni.

Poi, più di quindici secoli dopo, si presentò una seconda opportunità all'interno di una nuova società, che stava vivendo una vigorosa espansione. Il bisogno sempre più acuto di pompare verso l'alto l'acqua delle miniere, scavate a profondità sempre maggiori, fornì lo stimolo. La vecchia pompa a mano (vedi capitolo quinto) sollevava l'acqua sfruttando il vuoto; nel corso del diciassettesimo secolo, gli uomini ebbero occasione di apprezzare sempre più la grande forza del vuoto, o, per meglio dire, la forza della pressione dell'aria chiamata in causa dalla presenza del vuoto.

Nel 1650, per esempio, il fisico tedesco Otto von Guericke (che era anche borgomastro della città di Magdeburgo) inventò una pompa pneumatica azionata dalla forza muscolare. Egli unì due emisferi metallici dotati di flange ed estrasse l'aria dal loro interno attraverso una valvola situata in uno di essi. Via via che la pressione all'interno diminuiva, quella esterna, non più completamente controbilanciata, comprimeva sempre di più l'uno contro l'altro i due emisferi. Alla fine, neppure un tiro a 8 cavalli da ciascuna parte riuscì a staccare i due emisferi; quando, però, si fece entrare nuovamente l'aria, essi si staccarono da soli. L'esperimento venne ripetuto di fronte a personaggi importanti, tra cui una volta lo stesso imperatore di Germania, ed ebbe grande risonanza.

A questo punto, molti inventori pensarono: perché non sostituire la forza muscolare con il vapore, per ottenere il vuoto? Supponiamo di riempire un cilindro (o un analogo recipiente) di

acqua e di riscaldarla fino al punto di ebollizione. Si formerà del vapore acqueo, che scaccerà l'acqua dal recipiente. Raffreddando quest'ultimo (per esempio, gettando dell'acqua fredda sulla sua superficie esterna), il vapore presente si condenserà, formando alcune gocce d'acqua e lasciando dello spazio vuoto. L'acqua che si vuol sollevare (per esempio, da una miniera inondata) potrà esser fatta risalire attraverso una valvola nel recipiente in cui è stato fatto il vuoto.

Un fisico francese, Denis Papin, comprese fin dal 1679 le possibilità offerte dal vapore e ideò una "pentola a pressione", un recipiente chiuso ermeticamente in cui faceva bollire dell'acqua. Il vapore, accumulandosi, creava una pressione che faceva innalzare il punto di ebollizione dell'acqua; a questa temperatura più alta, i cibi cuocevano prima e meglio. Deve esser stata la pentola a pressione a suscitare in Papin l'idea di utilizzare il vapore facendogli compiere del lavoro. Egli introdusse un po' d'acqua in fondo a un tubo e la convertì in vapore riscaldandola. Il vapore, espandendosi energicamente, sospingeva verso l'alto uno stantuffo.

La prima persona che tradusse quest'idea in un congegno utilizzabile in pratica fu però un ingegnere militare inglese, Thomas Savery. La sua macchina a vapore poteva essere usata per pompare l'acqua di una miniera o di un pozzo, o per far funzionare una ruota idraulica: pertanto egli la chiamò l'«Amica del Minatore». Era però pericolosa (perché la pressione elevata del vapore poteva far scoppiare recipienti e tubi) e aveva un basso rendimento (perché il calore del vapore andava perso tutte le volte che si raffreddava il contenitore). Savery brevettò la sua macchina nel 1698; sette anni dopo un fabbro inglese, Thomas Newcomen, costruì una macchina più progredita, capace di funzionare con vapore a bassa pressione; essa utilizzava la pressione atmosferica per far abbassare il pistone nel cilindro.

Anche la macchina di Newcomen non brillava per rendimento (anche qui si doveva raffreddare il cilindro dopo ogni riscaldamento); la macchina a vapore rimase un congegno di scarsa importanza per altri sessanta anni e più, finché uno scozzese fabbricante di strumenti di precisione, James Watt, trovò il modo di renderla praticamente utilizzabile. Ingaggiato dall'Università di Glasgow per riparare un modello della macchina di Newcomen che non funzionava bene, Watt cominciò a riflettere sullo spreco di combustibile di questa macchina.

Dopo tutto, cosa obbligava a raffreddare ogni volta il recipiente che conteneva il vapore? Perché non tenere sempre caldo il cilindro, facendo passare il vapore in una camera di condensazione separata, che si sarebbe potuta mantenere fredda? Watt introdusse parecchie altre migliorie: sfruttamento della pressione del vapore anche per contribuire a far abbassare il pistone, introduzione di vari raccordi meccanici per ottenerne un moto rettilineo, collegamento del moto alternativo del pistone all'asse di una ruota, che pertanto si metteva a girare, e così via. Nel 1782, la sua macchina a vapore, che, con una tonnellata di carbone, poteva effettuare almeno il triplo del lavoro rispetto a quella di Newcomen, era pronta per essere utilizzata come un cavallo da lavoro universale.

In seguito il rendimento della macchina a vapore fu continuamente aumentato, soprattutto attraverso l'uso di vapore sempre più caldo, a pressioni sempre maggiori. La fondazione della termodinamica da parte di Carnot (vedi capitolo ottavo) ebbe principalmente origine dalla comprensione del fatto che il rendimento massimo raggiungibile da una macchina a vapore è proporzionale alla differenza di temperatura tra il serbatoio caldo (solitamente la caldaia) e quello freddo (il condensatore separato).

Nel corso del '700 vennero inventati molti congegni meccanici per filare e tessere su più vasta scala (sostituendo l'arcolaio, usato nel Medioevo). In un primo tempo questi macchinari venivano azionati dalla forza muscolare degli animali o da ruote idrauliche, ma nel 1790 fu compiuto il passo cruciale: venne adottata la macchina a vapore per azionarli.

Così gli impianti tessili di nuova costruzione non richiedevano più la vicinanza di correnti d'acqua veloci né la disponibilità di animali, ma si potevano costruire in qualsiasi località. La Gran Bretagna entrò in una fase di trasformazione rivoluzionaria: i lavoratori lasciavano la campagna e abbandonavano le manifatture familiari per riversarsi in massa nelle grandi fabbriche (dove le

condizioni di lavoro furono incredibilmente dure e umilianti, fino a quando la società comprese, non senza riluttanza, che gli esseri umani vanno trattati in modo non peggiore degli animali).

La stessa trasformazione si verificò in altri paesi che adottarono il nuovo sistema basato sull'uso della macchina a vapore: era la Rivoluzione industriale (un'espressione introdotta nel 1837 dall'economista francese Jerome Adolphe Blanqui).

La macchina a vapore rivoluzionò radicalmente anche i trasporti. Nel 1787 l'inventore americano John Fitch costruì un battello a vapore che, se funzionava bene dal punto di vista tecnico, si rivelò fallimentare da quello finanziario; Fitch morì sconosciuto e non apprezzato. Robert Fulton, imprenditore più abile di Fitch, varò il suo piroscafo, il "Clermont", nel 1807, sostenendolo con tanta pubblicità che finì per esserne considerato l'inventore, mentre in realtà non era neppure il primo ad averne costruito uno, così come Watt non era stato il primo a fabbricare una macchina a vapore.

Forse Fulton meriterebbe di essere ricordato maggiormente per i suoi tenaci tentativi di costruire un'imbarcazione sottomarina. Quelle che costruì non erano utilizzabili, ma anticipavano parecchi sviluppi moderni. Il "Nautilus", uno dei sottomarini costruiti da Fulton, probabilmente ispirò Jules Verne quando scrisse il romanzo fantascientifico "Ventimila leghe sotto i mari", pubblicato nel 1870, dove compare appunto un sottomarino di tal nome. A sua volta quest'ultimo diede l'ispirazione per il nome del primo sottomarino nucleare (vedi capitolo decimo).

Dopo il 1830 navi a vapore incominciarono ad attraversare l'Atlantico, azionate dall'elica, un progresso considerevole rispetto alle ruote laterali. A partire dal 1850, poi, i veloci ed eleganti Clipper cominciarono ad ammainare le vele, sostituiti dai piroscafi nelle marine mercantili e militari di tutto il mondo.

Più tardi un ingegnere britannico, Charles Algernon Parsons (un figlio di quel Lord Rosse che aveva scoperto la nebulosa Granchio) ideò un miglioramento importante nell'applicazione alle navi della macchina a vapore: invece di far azionare dal vapore un pistone, che, a sua volta, azionava una ruota, egli pensò di eliminare l'«intermediario», usando un getto di vapore per investire direttamente delle palette disposte lungo il bordo di una ruota; quest'ultima doveva però reggere alle alte velocità e alle temperature elevate; nel 1884, Parsons produsse la prima "turbina a vapore" funzionante.

Nel 1897, per il sessantesimo anniversario dell'incoronazione della regina Vittoria, la Marina britannica stava facendo sfilare in un'imponente parata le sue navi da guerra a vapore, quando la "Turbinia" di Parsons, azionata appunto a turbina, le superò in silenzio filando alla velocità di 35 nodi. Nessuna nave della Marina britannica avrebbe potuto raggiungerla, e questo fu il miglior colpo pubblicitario che l'inventore potesse augurarsi. In breve tempo tutte le navi, sia mercantili che da guerra, furono azionate a turbina.

Nel frattempo la macchina a vapore aveva cominciato a dominare anche il campo dei trasporti via terra. Nel 1814 l'inventore inglese George Stephenson (che doveva molto al lavoro precedente di un ingegnere pure inglese, Richard Trevithick) costruì la prima "locomotiva a vapore" funzionante. Il moto rettilineo alternativo degli stantuffi azionati dal vapore poteva far girare delle ruote metalliche su binari di acciaio, esattamente come faceva girare delle ruote a pale nell'acqua.

Nel 1830 l'imprenditore americano Peter Cooper costruì la prima locomotiva a vapore dell'emisfero occidentale. Per la prima volta nella storia, viaggiare via terra diventava altrettanto comodo quanto viaggiare per mare, e il commercio via terra poteva competere con quello marittimo. Nel 1840 una linea ferroviaria raggiungeva il fiume Mississippi e nel 1869 gli Stati Uniti erano attraversati dalla strada ferrata in tutta la loro ampiezza.

L'ELETTRICITA'.

Per sua natura, la macchina a vapore risulta adatta solo per una produzione di energia su vasta scala e costante nel tempo, mentre non è efficiente nella fornitura di piccole dosi di energia e

non può funzionare a intermittenza, al comando di un pulsante: una macchina a vapore «piccola», in cui tenere il fuoco basso, o da mettere in azione a comando, sarebbe un'assurdità. Ma la stessa generazione che vide lo sviluppo della forza motrice del vapore assistette anche alla scoperta di un sistema capace di fornire energia dotata dei requisiti citati sopra - una riserva sempre pronta, che poteva diventare disponibile ovunque, in piccole quantità o su vasta scala, solo premendo un bottone. Si trattava, ovviamente, dell'elettricità.

ELETTRICITÀ STATICA.

Talete, il filosofo greco, aveva osservato, verso il 600 avanti Cristo, che una resina fossile che si trovava sulle rive del Baltico, che noi chiamiamo ambra e i greci chiamavano "élektron", acquisiva la capacità di attrarre piume, fili, batuffoli di lanugine, quando veniva strofinata con un pezzo di pelliccia. Fu l'inglese William Gilbert, lo studioso del magnetismo (vedi capitolo quinto), a proporre per primo di chiamare tale forza attrattiva "elettricità", appunto dal greco "élektron". Egli scoprì che, oltre all'ambra, altri materiali, come il vetro, acquistavano proprietà elettriche se li si strofinava.

Nel 1733, il chimico francese Charles Francis de Cisternay Du Fay scoprì che due bacchette di ambra, o due bacchette di vetro, elettrizzate per strofinio si respingevano a vicenda. Viceversa, una bacchetta di vetro elettrizzata attraeva una bacchetta di ambra elettrizzata; se poi le si metteva a contatto, perdevano la loro elettricità. Egli ritenne che ciò dimostrasse l'esistenza di due tipi diversi di elettricità, che denominò rispettivamente "vetrosa" e "resinosa".

Lo studioso americano Benjamin Franklin, che si interessò molto all'elettricità, sostenne invece che si trattava di un unico fluido: quando si strofinava il vetro, l'elettricità vi penetrava, caricandolo «positivamente», mentre quando si strofinava l'ambra l'elettricità ne usciva, e perciò essa diventava carica «negativamente». Quando poi una bacchetta negativa entrava in contatto con una positiva, il fluido elettrico passava da quella positiva a quella negativa, finché non veniva raggiunto un equilibrio neutro.

Era una congettura molto acuta: se sostituiamo il termine "elettroni" alla parola "fluido", usata da Franklin, e invertiamo la direzione dei moti (infatti gli elettroni passano dall'ambra al vetro), la sua supposizione risulta sostanzialmente corretta.

Un inventore francese, Jean Théophile Desaguliers, propose, nel 1740, di chiamare "conduttori" quelle sostanze nelle quali il fluido elettrico si muoveva liberamente (per esempio i metalli), e "isolanti" quelle (come il vetro e l'ambra) in cui tale fluido non circolava liberamente.

Gli esperimenti mostrarono che era possibile accumulare gradualmente una ingente carica elettrica in un conduttore, se lo si isolava, in modo che non perdesse elettricità, con del vetro o con uno strato di aria. La più famosa apparecchiatura di questo genere fu la "bottiglia di Leida", ideata nel 1745 dallo studioso tedesco Ewald Georg von Kleist, ma utilizzata in pratica per la prima volta all'Università di Leida, in Olanda, dove fu costruita indipendentemente qualche mese dopo dallo studioso olandese Pieter van Musschenbroek. La bottiglia di Leida è ciò che oggi viene chiamato un "condensatore", cioè un sistema formato da due superfici conduttrici, separate da un piccolo spessore di un isolante, entro cui si può immagazzinare una certa quantità di carica elettrica.

Nel caso della bottiglia di Leida la carica si accumula su un foglio di stagnola che riveste le pareti di una bottiglia di vetro; una catenella di ottone che passa attraverso il tappo entra in contatto con la stagnola; se si tocca la bottiglia carica, si avverte una forte scossa elettrica. La bottiglia di Leida può produrre anche una scintilla. Naturalmente, al crescere della carica accumulata su un corpo, cresce anche la sua tendenza a sfuggirne. La forza che fa passare gli elettroni dalla regione dove più sono in eccesso (il "polo negativo") a quella dove maggiormente difettano (il "polo positivo") è detta "forza elettromotrice" (fem) o "potenziale elettrico". Se il potenziale diventa abbastanza elevato, gli elettroni finiranno per oltrepassare l'intervallo isolante o l'aria tra i due poli, producendo una scintilla vivida e un rumore crepitante. La luce della scintilla è dovuta alla

radiazione creata dalle collisioni di innumerevoli elettroni con le molecole dell'aria, e il rumore è dovuto all'espansione dell'aria bruscamente riscaldata, seguita dall'irruzione di aria più fredda nel parziale vuoto prodottosi momentaneamente.

Era naturale chiedersi se fulmine e tuono fossero l'analogo, su larga scala, del fenomeno che avviene nella bottiglia di Leida. Uno studioso inglese, William Wall, aveva suggerito appunto questo, già nel 1708.

Ciò bastò a indurre Benjamin Franklin a effettuare il suo famoso esperimento del 1752. Egli fece volare, durante un temporale, un aquilone munito di una punta metallica alla quale aveva attaccato un filo di seta in grado di condurre l'elettricità dai nembi temporaleschi fino a terra; quando Franklin avvicinò la mano a una chiave metallica legata al filo di seta, scoccò una scintilla. Franklin lasciò che la chiave si caricasse nuovamente e la usò poi per caricare una bottiglia di Leida, con risultati analoghi a quelli ottenuti caricandola con qualsiasi altro sistema. Franklin aveva così dimostrato che le nubi temporalesche sono cariche di elettricità, e che tuono e fulmine sono prodotti effettivamente da una sorta di bottiglia di Leida atmosferica, nella quale le nubi costituiscono un polo e la terra l'altro.

L'aspetto più fortunato di questo esperimento, dal punto di vista personale di Franklin, fu il fatto di esservi sopravvissuto; altri, infatti, che provarono a ripeterlo, vi persero la vita, perché la carica indotta sul puntale metallico dell'aquilone si accumulava fino a produrre una scarica tanto intensa da risultare letale all'uomo che teneva in mano il filo di seta.

Franklin applicò subito nella pratica questo progresso della teoria, ideando il "parafulmine", una semplice asta di ferro da collocarsi nel punto più alto di un edificio e da collegarsi a terra mediante fili metallici. Il puntale aguzzo sottraeva cariche elettriche dalle nubi, come Franklin dimostrò sperimentalmente; e se cadeva un fulmine, la scarica veniva condotta a terra senza che facesse danni.

I danni causati dai fulmini diminuirono drasticamente allorché i parafulmini si diffusero in Europa e nelle colonie americane - risultato non da poco. Tuttavia ancora oggi 2 miliardi di fulmini colpiscono la terra ogni anno, e si stima che le vittime siano venti persone al giorno, più un'ottantina di feriti.

L'esperimento di Franklin ebbe due effetti elettrizzanti (scusate il gioco di parole). In primo luogo suscitò un grande interesse per l'elettricità in tutto il mondo; in secondo luogo diede alle colonie americane diritto di cittadinanza, per così dire, da un punto di vista culturale. Per la prima volta un americano aveva mostrato di valere come scienziato abbastanza da destare l'ammirazione del mondo colto europeo dell'Età della Ragione. Quando, un quarto di secolo dopo, Franklin rappresentò a Versailles i neonati Stati Uniti e chiese aiuti, ottenne il rispetto di tutti, non solo come semplice inviato di una nuova repubblica, ma anche come gigante in campo intellettuale: egli era colui che aveva addomesticato il fulmine, portandolo umile a terra. Quell'aquilone contribuì non poco alla causa dell'indipendenza americana.

Grazie all'opera di Franklin, la ricerca sull'elettricità fece poi passi da gigante. Nel 1785 il fisico francese Charles Augustin de Coulomb effettuò misurazioni quantitative sull'attrazione e la repulsione elettriche, mostrando che esse erano inversamente proporzionali al quadrato della distanza fra le cariche interessate. Sotto questo aspetto vi è un'analogia tra l'attrazione elettrica e l'attrazione gravitazionale. Per ricordare questa scoperta, l'unità di misura della quantità di carica elettrica è stata chiamata "coulomb".

ELETTRICITÀ DINAMICA.

Poco tempo dopo, lo studio dell'elettricità compì una svolta in una nuova e sorprendente direzione, che si rivelò quanto mai feconda. Fin qui abbiamo parlato dell'"elettricità statica", quella cioè di una carica che, situata su un oggetto, vi rimane. La scoperta di una carica elettrica che si muove, cioè delle correnti elettriche, ovvero dell'"elettricità dinamica", venne fatta dall'anatomista

italiano Luigi Galvani. Nel 1791 questi scoprì accidentalmente che i muscoli della coscia di una rana sezionata si contraevano se li si toccava simultaneamente con due metalli diversi. (Fu così che entrò nel linguaggio il verbo "galvanizzare".)

I muscoli si comportavano come se fossero stati stimolati dalla scintilla elettrica di una bottiglia di Leida; pertanto Galvani fece l'ipotesi che i muscoli contenessero qualcosa, che egli chiamò "elettricità animale". Altri, invece, attribuirono la carica elettrica al contatto tra i due metalli e non ai muscoli. Nel 1800, il fisico italiano Alessandro Volta studiò varie combinazioni di metalli diversi, messi in contatto non già dal tessuto muscolare, ma da semplici soluzioni.

Volta cominciò utilizzando catene di metalli differenti collegati da tazze semipiene di acqua salata; per evitare che il liquido si versasse continuamente, preparò poi dei dischetti di rame e zinco e li dispose in pila alternandoli uno sull'altro. Fece anche uso di dischetti di cartone inumiditi in acqua salata; la "pila di Volta" era pertanto formata da zinco, rame, cartone, zinco, rame, cartone, zinco, rame, e così via. Da una siffatta disposizione si poteva ricavare un flusso continuo di corrente elettrica.

Una qualsiasi serie di unità analoghe, ripetute indefinitamente, può essere chiamata batteria. Lo strumento di Volta fu la prima "batteria elettrica", o "cella elettrochimica". Doveva trascorrere un secolo prima che gli scienziati comprendessero appieno il ruolo svolto dagli elettroni nelle reazioni chimiche, riuscendo a interpretare le correnti elettriche in termini di spostamenti e flussi di elettroni; tuttavia nel frattempo essi poterono far uso di tali correnti, anche senza una piena comprensione della loro natura.

Humphry Davy usò una corrente elettrica per separare gli atomi di molecole dotate di legami chimici molto forti, e fu il primo, nel 1807 e nel 1808, a ottenere metalli come il sodio, il potassio, il magnesio, il calcio, lo stronzio e il bario. Faraday (assistente e pupillo di Davy) proseguì nella sua opera, enunciando le leggi generali dell'"elettrolisi", il processo con cui le molecole venivano scisse; mezzo secolo dopo, le sue ricerche avrebbero guidato Arrhenius verso la formulazione dell'ipotesi della dissociazione ionica (vedi capitolo quinto).

Le molteplici applicazioni dell'elettricità dinamica nel secolo e mezzo successivo all'invenzione della pila di Volta sembravano aver messo in ombra l'elettricità statica, riducendola a una mera curiosità storica. Ma era un errore, perché la conoscenza e l'ingegno umano non si fermano mai. Nel 1960 l'inventore americano Chester Carlson realizzò un efficace congegno per la copiatura, che attirava il nerofumo su un foglio di carta, appunto in virtù di un'azione elettrostatica localizzata. Questo sistema di copiatura, che non richiede né soluzioni né agenti umidi, si chiama "xerografia" (dalle parole greche che significano «scrittura a secco») e ha rivoluzionato il lavoro negli uffici.

I nomi dei pionieri dello studio dell'elettricità sono stati immortalati nelle denominazioni delle unità di misura delle varie grandezze elettriche. Abbiamo già parlato del "coulomb", l'unità della quantità di carica elettrica. Un'altra unità è il "faraday": 96500 coulomb sono pari a 1 faraday. Il nome di Faraday ritorna anche nel "farad", l'unità di capacità elettrica. Poi vi è l'unità dell'intensità di corrente elettrica (che è la quantità di corrente che passa in un dato momento in un conduttore), unità che viene chiamata "ampere", in onore del fisico francese Ampère (vedi capitolo quinto). Un ampere è pari a 1 coulomb al secondo. L'unità di forza elettromotrice (la forza che fa circolare la corrente) è il "volt", in onore di Volta.

Una data forza elettromotrice non fa circolare sempre la stessa quantità di corrente elettrica, se agisce in circuiti diversi: se il conduttore è buono la corrente generata sarà intensa, se il conduttore è cattivo sarà scarsa, e praticamente non passerà corrente se il materiale non è conduttore. Nel 1827, il matematico tedesco George Simon Ohm studiò la "resistenza" al flusso della corrente, e mostrò che poteva essere rigorosamente correlata al numero di ampere di corrente che passavano in un circuito sotto l'azione di una forza elettromotrice nota; si può determinare la resistenza calcolando il rapporto tra forza elettromotrice e intensità di corrente. È questa la "legge di Ohm", e l'unità di resistenza elettrica è l'"ohm": 1 ohm è uguale a 1 volt diviso per 1 ampere.

PRODUZIONE DELL'ELETTRICITÀ.

La conversione dell'energia chimica in elettricità, così come si verifica nella pila di Volta e nel gran numero di congegni che ne sono derivati, è sempre stata relativamente costosa, perché le sostanze chimiche necessarie non sono comuni e pertanto costano parecchio. Per tale ragione all'inizio del diciannovesimo secolo l'elettricità, mentre era utilizzabile in laboratorio con grande profitto, non poteva venir applicata su vasta scala nell'industria.

Vi sono stati tentativi sporadici di utilizzare come fonte di elettricità le reazioni chimiche che avvengono nella normale combustione. Combustibili come l'idrogeno (o, ancora meglio, il carbone) costano assai meno di metalli come il rame e lo zinco. Già nel 1839 lo scienziato inglese William Grove aveva ideato una cella elettrochimica alimentata dalla combinazione dell'idrogeno e dell'ossigeno. Era un'idea interessante, ma poco pratica. Più di recente i fisici hanno dedicato molti sforzi alla realizzazione di "pile a combustibile" effettivamente utilizzabili. La teoria è perfettamente definita, ma i problemi pratici si dimostrano di difficile soluzione e richiedono ulteriori ricerche.

Non sorprende quindi il fatto che l'uso dell'elettricità su vasta scala sia divenuto possibile, nella seconda metà del diciannovesimo secolo, per merito di qualcosa di diverso dalla pila. Già negli anni trenta, Faraday aveva ottenuto dell'elettricità dal movimento meccanico di un conduttore attraverso le linee di forza di un "magnete" (vedi capitolo quinto). Questo "generatore elettrico", o "dinamo" (dalla parola greca che significa «forza»), trasformava l'energia cinetica in elettricità. Il movimento veniva mantenuto ricorrendo al vapore, che a sua volta era ottenuto dalla combustione.

Così, assai più indirettamente che in una pila a combustibile, si poteva convertire in elettricità l'energia della combustione del carbone, o del petrolio (o anche del legno). A partire dal 1844 furono usate versioni ingombranti e non troppo funzionali di questi generatori per azionare i macchinari.

Occorrevano però magneti sempre più potenti, in modo che il movimento attraverso linee di forza più intense producesse flussi maggiori di elettricità. Per ottenere questi magneti più potenti, si ricorse proprio alle correnti elettriche. Nel 1823 lo sperimentatore inglese William Sturgeon avvolse diciotto spire di filo di rame scoperto intorno a una barra di ferro ad U, realizzando così un "elettromagnete". Al passaggio della corrente, il campo magnetico da essa prodotto si concentrava nella barra di ferro che allora era in grado di sollevare una quantità di ferro pari a venti volte il proprio peso. Quando non passava corrente, la barra cessava di essere un magnete e non poteva sollevare nulla.

Nel 1829, il fisico americano Joseph Henry apportò un notevole miglioramento a questo dispositivo, usando filo isolato, che in quanto tale poteva essere avvolto in più spire anche vicine, formando degli avvolgimenti senza timore di corti circuiti. Ogni spira in più aumentava l'intensità del campo magnetico e la potenza dell'elettromagnete. Nel 1831, Henry aveva prodotto un elettromagnete, di non grandi dimensioni, che poteva sollevare più di una tonnellata di ferro.

L'elettromagnete era chiaramente la risposta all'esigenza di migliori generatori elettrici: nel 1845 il fisico inglese Charles Wheatstone utilizzò un elettromagnete proprio a tale scopo. La comprensione della teoria delle linee di forza aumentò dopo l'interpretazione data da Maxwell del lavoro di Faraday (vedi capitolo quinto) negli anni dopo il 1860; e nel 1872 l'ingegnere elettrotecnico tedesco Friedrich von Hefner-Alteneck progettò il primo generatore elettrico veramente efficiente. Finalmente si poteva produrre l'elettricità a basso costo e in grandi quantità, e non più solo bruciando dei combustibili, ma anche utilizzando la caduta dell'acqua.

PRIME APPLICAZIONI TECNOLOGICHE DELL'ELETTRICITÀ.

Per il lavoro che portò alle prime applicazioni dell'elettricità alla tecnologia, gran parte del merito va attribuita a Joseph Henry. La prima applicazione dell'elettricità da parte di Henry fu l'invenzione del telegrafo. Henry ideò un sistema di relè che permetteva di trasmettere la corrente elettrica lungo chilometri di cavo.

L'intensità di una corrente diminuisce rapidamente quando essa viaggia a tensione costante per lunghi tratti di conduttore resistivo; i relè di Henry erano basati sull'idea di attivare con il segnale in via di estinzione un piccolo elettromagnete, che azionava un interruttore, il quale a sua volta faceva passare un impulso di energia, fornito da centrali di alimentazione poste a intervalli appropriati. Così un messaggio formato da impulsi elettrici in codice poteva percorrere una considerevole distanza. Henry costruì effettivamente un telegrafo che funzionava.

Essendo un uomo disinteressato, che credeva che la conoscenza andasse condivisa con il mondo intero, Henry non brevettò le sue scoperte, e così non gli fu riconosciuto il merito di questa invenzione. Tutto il merito andò all'artista Samuel Finley Breese Morse (che era anche un eccentrico bigotto). Con l'aiuto di Henry (che questi gli prodigò gratuitamente, ma che fu poi riconosciuto con riluttanza), Morse costruì nel 1844 il primo telegrafo di utilità pratica. Il principale contributo originale dato da Morse alla telegrafia fu il sistema di punti e linee noto come "alfabeto Morse".

Ma l'innovazione più importante realizzata da Henry nel campo dell'elettricità fu il motore elettrico. Henry mostrò che si poteva usare la corrente elettrica per far girare una ruota, così come una ruota che gira può generare corrente elettrica. E una ruota azionata elettricamente (un motore) poteva essere utilizzata per far funzionare dei macchinari. Il motore era trasportabile, poteva essere acceso o spento a piacimento (senza dover aspettare che il vapore andasse in pressione) e poteva essere ridotto a dimensioni piccole a piacere. Il problema era quello di trasportare l'elettricità dal luogo in cui veniva prodotta a quello in cui veniva usato il motore. Si doveva trovare un sistema per ridurre le perdite di energia elettrica (sotto forma di calore dissipato) durante il percorso lungo i fili.

Una risposta fu il "trasformatore". Gli sperimentatori avevano scoperto che tali perdite sono molto minori quando la corrente viene trasmessa a bassa intensità. Si pensò allora di elevare la tensione in uscita dal generatore, ricorrendo a un trasformatore che - moltiplicando la tensione, ad esempio, per tre - riduce a un terzo l'intensità di corrente. All'altro capo della linea si può nuovamente abbassare la tensione, in modo da portare l'intensità della corrente al livello necessario per far funzionare i motori.

Il trasformatore usa la corrente che fluisce in un avvolgimento "primario" per indurre una corrente ad alta tensione in un avvolgimento "secondario". L'induzione richiede che vari il campo magnetico all'interno del secondo avvolgimento. Per questo non si può usare una corrente costante, ma si deve usare una corrente che cambia continuamente, raggiungendo un massimo, scendendo a zero, per poi crescere in direzione opposta - in altre parole, occorre una "corrente alternata".

La corrente alternata (A.C.) si impose sulla corrente continua (D.C.) non senza contrasti. Thomas Alva Edison, il personaggio più importante nel campo dell'elettricità negli ultimi decenni del diciannovesimo secolo, si schierò dalla parte della seconda, creando la prima centrale a corrente continua a New York nel 1882, per alimentare l'illuminazione elettrica, da lui stesso inventata. Egli combatteva la corrente alternata sostenendo che era più pericolosa (per esempio con l'argomentazione che veniva usata nella sedia elettrica). Gli si opponeva strenuamente Nikola Tesla, un ingegnere che aveva lavorato per Edison e da questi era stato trattato in modo scorretto. Nel 1888 Tesla sviluppò un ottimo sistema per l'uso della corrente alternata.

Nel 1893 George Westinghouse, anch'egli sostenitore della corrente alternata, riportò una vittoria cruciale su Edison, ottenendo per la propria società il contratto per la realizzazione di una centrale elettrica a corrente alternata sulle cascate del Niagara. Nei decenni che seguirono, Steinmetz diede solide basi matematiche alla teoria delle correnti alternate. Oggi la corrente alternata è il sistema quasi universalmente adottato per la distribuzione dell'energia elettrica (anche se, nel 1966, gli ingegneri della General Electric hanno ideato un trasformatore di corrente continua

- cosa a lungo ritenuta impossibile - che tuttavia richiede temperature ottenute con l'elio liquido e ha un basso rendimento; si tratta dunque di un'idea affascinante dal punto di vista teorico, che non è però probabile abbia nell'immediato utilizzazione pratica).

TECNOLOGIA ELETTRICA.

La macchina a vapore è un "motore primo": utilizza cioè energia che già esiste in natura (l'energia chimica del legno, del petrolio, del carbone) e la trasforma in lavoro. Il motore elettrico non è un motore primo: esso converte elettricità in lavoro, ma l'elettricità deve a sua volta essere ottenuta bruciando combustibili o dall'energia di caduta dell'acqua. Per questa ragione l'elettricità è meno conveniente del vapore per i lavori pesanti, pur potendo ugualmente essere utilizzata a questo scopo. All'Esposizione di Berlino del 1879 un locomotore elettrico (che attingeva la corrente dalla terza rotaia) riuscì a trainare un treno passeggeri. Oggi i treni a trazione elettrica sono cosa comune per i trasporti rapidi, soprattutto all'interno delle città, perché i costi maggiori sono più che compensati dalla maggior pulizia e dal funzionamento più silenzioso.

IL TELEFONO.

Tuttavia l'elettricità dà il meglio di sé là dove svolge compiti inaccessibili al vapore. È questo, per esempio, il caso del telefono, brevettato dall'inventore di origine scozzese Alexander Graham Bell nel 1876. Nel microfono le onde sonore emesse da chi parla colpiscono una sottile membrana di acciaio, facendola vibrare di conseguenza: le vibrazioni della membrana provocano a loro volta una modulazione analoga in una corrente elettrica, che si rafforza e si indebolisce rispecchiando esattamente l'andamento delle onde sonore. Nel ricevitore le fluttuazioni d'intensità della corrente attivano un elettromagnete, che fa vibrare una membrana e riproduce le onde sonore.

Sulle prime il telefono era un congegno rudimentale e di funzionamento poco affidabile; tuttavia costituì la grande attrazione dell'Esposizione di Filadelfia del 1876, che celebrava il centesimo anniversario della Dichiarazione d'Indipendenza. Durante la sua visita, l'imperatore del Brasile, Pedro Secondo, volle provare il telefono e lasciò cadere l'apparecchio sbalordito, esclamando: «Ma parla!», frase riprodotta a caratteri cubitali dai titoli dei giornali. Un altro visitatore, Lord Kelvin, rimase altrettanto impressionato, mentre il grande Maxwell fu sbalordito che una cosa tanto semplice riuscisse a riprodurre la voce umana. Nel 1877 la regina Vittoria acquistò un telefono, il che ne assicurò il successo.

Sempre nel 1877, Edison ideò un miglioramento essenziale, costruendo un microfono che conteneva della polvere di carbone: quando la membrana la premeva, questa polvere conduceva più corrente; quando la membrana si allontanava, essa ne conduceva meno. In tal modo le onde sonore della voce venivano tradotte dal microfono con grande fedeltà in impulsi elettrici variabili, e la voce veniva riprodotta nel ricevitore con maggiore chiarezza.

Non era però possibile stabilire comunicazioni telefoniche a grandi distanze, se non a costi rovinosi, dovuti alla necessità di impiegare un filo di rame di grande spessore (e quindi di bassa resistenza).

Alla fine del secolo il fisico serbo-croato naturalizzato americano Michael Idvorsky Pupin ebbe l'idea di inserire, a distanze regolari, bobine di induttanza in un sottile filo di rame, con il risultato di rinforzare i segnali che potevano così percorrere lunghe distanze. La Bell Telephone Company acquistò il dispositivo nel 1901; nel 1915, con l'apertura della linea New York-San Francisco, la telefonia a grande distanza era un fatto acquisito.

La centralinista telefonica (si trattava quasi sempre di donne) divenne un personaggio familiare e indispensabile della vita quotidiana, e tale restò per mezzo secolo, cominciando a perdere di importanza con l'inizio della diffusione del telefono a disco combinatorio, nel 1921. L'automazione seguitò ad avanzare, al punto che, quando nel 1983 centinaia di migliaia di

dipendenti delle società telefoniche degli Stati Uniti fecero uno sciopero di due settimane, il servizio continuò senza subire interruzioni. Oggigiorno le onde radio e i satelliti per telecomunicazioni aumentano la versatilità del telefono.

REGISTRAZIONE DEL SUONO.

Nel 1877, un anno dopo l'invenzione del telefono, Edison brevettò il "fonografo". Le prime registrazioni erano incise in solchi su fogli di stagnola avvolti intorno a un cilindro rotante; l'inventore americano Charles Sumner Tainter li sostituì nel 1885 con cilindri di cera, e poi Emile Berliner nel 1887 introdusse l'uso di dischi rivestiti di cera. Nel 1904 Berliner apportò un miglioramento ancora più importante: sul disco piatto la puntina vibrava lateralmente. La maggior compattezza del disco eliminò quasi completamente dal mercato l'ormai superato cilindro di Edison (sul quale la puntina vibrava verticalmente).

Nel 1925, si cominciò a registrare usando l'elettricità, mediante il microfono, che traduceva il suono in una corrente elettrica modulata, grazie a un cristallo piezoelettrico che sostituiva la membrana metallica - il cristallo permetteva di riprodurre il suono più fedelmente. Negli anni trenta furono introdotte le valvole termoioniche con funzione amplificatrice.

Nel 1948, il fisico americano di origine ungherese Peter Goldmark ideò il "long-playing" (L.P.), con i suoi 33 giri e un terzo al minuto, anziché i 78 giri in uso fino ad allora. Un L.P. poteva contenere sei volte più musica dei vecchi dischi, consentendo di ascoltare una sinfonia senza dover di continuo voltare o cambiare disco.

L'elettronica ha reso possibili l'"alta fedeltà" ("hi-fi", "high fidelity") e la "stereofonia", rimuovendo in pratica tutte le barriere meccaniche tra l'orchestra e il cantante da una parte e l'ascoltatore dall'altra.

La registrazione su nastro era già stata inventata nel 1898 da un ingegnere elettrotecnico danese, Valdemar Poulsen, ma dovette aspettare alcuni progressi tecnologici per diventare praticamente utilizzabile. Un elettromagnete, rispondendo a una corrente elettrica modulata dalle onde sonore, magnetizza il rivestimento (costituito di una speciale polvere) di un nastro o di un filo che gli scorre vicino; per il riascolto, un altro elettromagnete «legge» l'andamento della magnetizzazione e lo traduce nuovamente in una corrente, che a sua volta riproduce il suono.

LA LUCE ARTIFICIALE PRIMA DELL'ELETTRICITÀ.

Di tutti i miracoli fatti dall'elettricità, certo quello più popolare fu la trasformazione della notte in giorno. Gli uomini si erano difesi dall'oscurità paralizzante in cui piombavano ogni giorno dopo il tramonto con i falò degli accampamenti, le torce, le lampade a olio, le candele; per circa mezzo milione di anni si poté contare solo su luci artificiali fioche e tremolanti.

Il diciannovesimo secolo apportò qualche progresso in questi antichi metodi di illuminazione: l'olio di balena e poi il cherosene adottati nelle lucerne consentivano di ottenere un'illuminazione più chiara ed efficiente. Il chimico austriaco Karl Auer von Welsbach scoprì che circondando la fiamma di una lampada con una reticella cilindrica di cotone impregnata di composti di torio e di cerio, si otteneva una luce più bianca e più brillante. La "rete di Welsbach", brevettata nel 1885, aumentò considerevolmente la luminosità della lampada a petrolio.

Fin dall'inizio del secolo l'illuminazione a gas venne introdotta dall'inventore scozzese William Murdock; questi convogliò mediante condutture il gas di carbone fino a un becco da cui poteva esser fatto uscire e acceso. Nel 1802, per celebrare un momentaneo accordo di pace con Napoleone, Murdock allestì una spettacolare illuminazione a gas; nel 1803 la sua fabbrica era normalmente illuminata con questo sistema. Nel 1807 alcune strade di Londra vennero illuminate a gas, e ben presto l'usanza si diffuse. Nel corso del secolo le grandi città diventarono sempre più illuminate di notte, cosa che ridusse il tasso di criminalità e accrebbe la sicurezza dei cittadini.

Il chimico americano Robert Hare scoprì che, indirizzando una fiamma a gas molto calda su un blocco di ossido di calcio (o calce), si otteneva una luce bianca molto brillante, che venne impiegata per illuminare i palcoscenici dei teatri molto meglio di quanto non fosse possibile in precedenza.

Tutte queste forme di illuminazione, dai falò ai becchi a gas, comportano fiamme libere. Inoltre c'è sempre il problema di accendere il combustibile - sia esso legno, carbone, petrolio o gas - se non si dispone già di una fiamma nelle vicinanze. Prima del diciannovesimo secolo il metodo meno laborioso consisteva nell'usare pietra focaia e acciarino; battendo l'una contro l'altro si poteva ottenere una scintilla, che, se si aveva fortuna, poteva accendere un'esca (un materiale infiammabile finemente suddiviso), la quale, a sua volta, poteva accendere una candela, e così via.

All'inizio del diciannovesimo secolo, i chimici cominciarono a cercare un modo per rivestire un'estremità di un pezzo di legno con sostanze capaci di accendersi se si innalzava la temperatura: era l'idea del "fiammifero". A innalzare la temperatura era l'attrito; sfregando il fiammifero su una superficie ruvida si produceva la fiamma.

I primi fiammiferi emanavano molto fumo e un odore sgradevole; le sostanze chimiche usate erano poi pericolosamente tossiche. Solo nel 1845 i fiammiferi diventarono davvero innocui, quando il chimico austriaco Anton Ritter von Schrotter introdusse l'uso del fosforo rosso. Infine furono realizzati i "fiammiferi di sicurezza", in cui il fosforo rosso è posto su una piccola striscia ruvida applicata sulla scatola, mentre la capocchia del fiammifero contiene gli altri prodotti chimici necessari. Né il fiammifero né la striscia possono accendersi da soli: occorre sfregarli l'uno contro l'altra per ottenere il fuoco.

C'è stato anche un ritorno all'acciarino e alla pietra focaia, ma con miglioramenti sostanziali. Al posto della pietra focaia si usa oggi il Mischmetal, una miscela di metalli (soprattutto cerio) che, sfregata contro una rotella zigrinata, produce delle scintille aventi una temperatura molto elevata. Al posto dell'esca vi è un "fluido infiammabile". Il risultato è l'"accendisigaro".

LA LUCE ELETTRICA.

Le fiamme libere, di un tipo o dell'altro, non sono stabili, e, quel che è peggio, costituiscono un costante pericolo di incendio. Occorreva qualcosa di completamente nuovo; d'altro canto, da tempo si sapeva che l'elettricità poteva fornire luce. Le bottiglie di Leida producevano scintille quando venivano scaricate; i conduttori di corrente elettrica talvolta diventavano incandescenti. Entrambi questi fenomeni sono stati sfruttati per l'illuminazione.

Nel 1805, Humphry Davy fece scoccare una scarica elettrica nell'aria interposta tra due conduttori; mantenendo costante la corrente, la scarica risultava continua; si aveva così un "arco elettrico". Quando l'elettricità divenne meno costosa, si poterono utilizzare le "lampade ad arco" per l'illuminazione. A partire dal 1870 le strade di Parigi e di qualche altra città furono illuminate con queste lampade; la loro luce, tuttavia, era cruda e tremolante e persisteva il pericolo d'incendio.

Sarebbe stato preferibile portare all'incandescenza un filamento, facendolo percorrere dalla corrente elettrica. Naturalmente, ciò doveva avvenire in assenza di ossigeno, altrimenti dopo poco tempo il filamento si sarebbe ossidato. I primi tentativi di eliminare l'ossigeno consistettero semplicemente nell'eliminare l'aria: nel 1875 Crookes (in occasione delle sue ricerche sui raggi catodici, vedi capitolo settimo) aveva ideato dei sistemi abbastanza rapidi ed economici per produrre un vuoto sufficiente per questo scopo; tuttavia i filamenti si rompevano troppo facilmente. Nel 1878 Thomas Edison, fresco del trionfo riportato con il fonografo, annunciò di voler affrontare il problema. Aveva solo trentun anni, ma la sua fama di inventore era tale che il solo annuncio bastò a far crollare le azioni delle società del gas alle borse di New York e di Londra.

Dopo centinaia di esperimenti e dopo incredibili frustrazioni, Edison trovò infine un materiale che poteva andar bene come filamento - un filo di cotone carbonizzato. Il 21 ottobre 1879 accese la sua lampadina, che rimase accesa per 40 ore di seguito. La sera dell'ultimo dell'anno,

Edison ne diede una trionfale dimostrazione pubblica, illuminando la strada principale di Menlo Park, nel New Jersey, dove si trovava il suo laboratorio. Brevettò subito la sua lampadina e ne avviò la produzione su vasta scala.

Edison non fu però l'unico inventore della lampada a incandescenza; almeno un altro inventore poteva rivendicare tale scoperta: l'inglese Joseph Swan che aveva esibito una lampada a filamento di carbone a una riunione della Chemical Society di Newcastle-on-Tyne il 18 dicembre 1878; Swan tuttavia riuscì a mettere in produzione la sua lampada solo nel 1881.

Edison passò a occuparsi del problema di rifornire le case di elettricità in misura costante e sufficiente per l'illuminazione domestica - compito che richiedeva almeno altrettanto ingegno quanto l'invenzione della lampadina. In seguito alla lampadina furono apportati due importanti miglioramenti. Nel 1910 William David Coolidge della General Electric Company adottò il tungsteno, un materiale molto resistente al calore, per il filamento; e, nel 1913, Irving Langmuir introdusse nella lampadina l'azoto, un gas inerte, per ostacolare l'evaporazione e la rottura del filamento che si verificavano nel vuoto.

L'argo (il cui uso venne introdotto nel 1920) serve allo scopo ancora meglio dell'azoto, perché è completamente inerte. Il cripto, altro gas inerte, va anche meglio, perché consente al filamento di raggiungere temperature ancora superiori e di illuminare meglio, senza riduzione della durata.

Per mezzo secolo il vetro trasparente delle lampadine rimase un inconveniente, poiché il filamento all'interno risultava abbacinante e fastidioso da guardare come il sole. Un ingegnere chimico, Marvin Pipkin, ideò un metodo pratico per lavorare la superficie interna del vetro (all'esterno la lavorazione avrebbe solo favorito l'accumulo di polvere, assorbendo in parte la luce). L'uso di "lampadine smerigliate" offrì finalmente una luce riposante, piacevole e costante.

L'avvento della luce elettrica eliminò il pericolo di incendi, creato in passato dalle fiamme libere. Purtroppo, però, esistono ancora situazioni in cui si usano fiamme, e probabilmente sempre ne esisteranno - nei caminetti, nelle cucine a gas, nelle caldaie a gas e a petrolio. Particolarmente deprecabile è il fatto che centinaia di milioni di fumatori portano con sé la fiamma, sotto forma di sigarette accese o di accendini sempre in funzione. Le perdite in beni e vite umane dovute a incendi provocati dalle sigarette (incendi di foreste e boscaglie, o addirittura di edifici) difficilmente possono essere sopravvalutati.

Il filamento incandescente delle lampadine ("luce da incandescenza", perché prodotta esclusivamente dal riscaldamento del filamento, che oppone resistenza al flusso della corrente elettrica) non costituisce l'unico modo per ottenere luce dall'elettricità. Per esempio, le cosiddette "luci al neon" (introdotte dal chimico francese Georges Claude nel 1910) sono dei tubi in cui una scarica elettrica eccita gli atomi del gas neon provocando l'emissione di una vivace luminescenza rossastra. La "lampada solare" contiene vapori di mercurio che, quando sono eccitati da una scarica, emettono una radiazione ricca di luce ultravioletta; questa lampada può essere usata, oltre che per abbronzarsi, anche per uccidere batteri o generare fluorescenza.

Quest'ultima ci conduce alle "lampade fluorescenti", presentate, nella loro forma attuale, nel 1939 alla Fiera Mondiale di New York. Qui la luce ultravioletta emessa dai vapori di mercurio eccita la fluorescenza in un "fosfòro" che riveste l'interno del tubo. Dato che questa luce fredda disperde poca energia sotto forma di calore, consuma meno elettricità.

Un tubo fluorescente da 40 watt emette altrettanta luce e assai meno calore di una lampadina a incandescenza da 150 watt. Dopo la seconda guerra mondiale, pertanto, c'è stato un passaggio massiccio all'uso dei tubi fluorescenti. I primi usavano come fosfòri sali di berillio, che però diedero origine a casi di grave avvelenamento ("berilliosi") in seguito alla respirazione di polveri che contenevano tali sali o all'introduzione della sostanza attraverso tagli provocati dalla rottura dei tubi. Dopo il 1949 sono stati usati fosfòri assai meno pericolosi.

L'ultimo sviluppo promettente in fatto di illuminazione elettrica è un metodo che converte direttamente l'elettricità in luce, senza passare per lo stadio della formazione di luce ultravioletta.

Nel 1936 il fisico francese Georges Destriau scoprì che una corrente alternata di elevata intensità poteva rendere luminescente un fosfòro come il solfuro di zinco. Oggi questo fenomeno, chiamato "elettroluminescenza", viene utilizzato per fabbricare pannelli luminosi di materia plastica o di vetro, contenenti dei fosfòri; si può così illuminare un locale rendendo luminescente una parete o il soffitto: l'ambiente risulta immerso in una luce diffusa, tenuamente colorata. Tuttavia il rendimento dell'elettroluminescenza è per il momento ancora troppo basso perché questa forma di illuminazione sia competitiva rispetto agli altri sistemi.

FOTOGRAFIA.

Probabilmente nessuna invenzione connessa con la luce ha dato tanto piacere all'umanità quanto la fotografia. Essa ha avuto inizio dall'osservazione che la luce, entrando attraverso un forellino in una piccola camera oscura, forma un'immagine tenue e invertita della scena che si trova all'esterno della camera. Ricerche su questo fenomeno erano state condotte già verso il 1550 dallo studioso napoletano Giambattista della Porta. Il rudimentale congegno prende il nome di "stenoscopio".

La quantità di luce che penetra in uno stenoscopio è piccolissima; sostituendo al forellino una lente, si può concentrare una quantità molto maggiore di luce, ottenendo un'immagine assai più luminosa. Una volta fatto questo passo, occorreva trovare una reazione chimica sensibile alla luce. Parecchi ricercatori si impegnarono in quest'impresa; i più noti tra loro furono i francesi Joseph Nicephore Niepce e Louis Jacques Mande Daguerre e l'inglese William Henry Fox Talbot. Niepce cercò di far annerire dalla luce solare il cloruro d'argento e ottenne la prima rudimentale fotografia nel 1822; essa aveva richiesto 8 ore di esposizione!

Daguerre si associò con Niepce poco prima che questi morisse e migliorò di molto il procedimento. Dopo aver esposto i sali d'argento alla luce solare, egli fece sciogliere quelli che non erano stati modificati in tiosolfato di sodio, secondo un procedimento suggerito dallo scienziato John Herschel (figlio di William Herschel). Nel 1839, Daguerre produceva i "dagherrotipi", le prime vere fotografie, che non richiedevano più di venti minuti di esposizione.

Talbot migliorò ancora il processo, producendo i "negativi", in cui le zone colpite dalla luce risultano annerite: si ha quindi l'inversione tra zone chiare e zone scure. Da un negativo si possono ottenere quanti "positivi" si vogliono, invertendo nuovamente i chiari e gli scuri, cioè riportando le cose come erano nell'originale. Nel 1844 Talbot pubblicò il primo libro illustrato con fotografie.

La fotografia ben presto dimostrò la sua enorme utilità ai fini della documentazione storica: negli anni successivi al 1850 gli inglesi fotografarono scene della guerra di Crimea, e nel decennio seguente il fotografo americano Matthew Brady, con un'apparecchiatura che oggi considereremmo assolutamente troppo primitiva per essere comunque utilizzata, realizzò le sue classiche immagini della Guerra di secessione americana.

Per quasi mezzo secolo si dovettero usare "lastre umide", cioè lastre di vetro su cui era spalmata un'emulsione di sostanze chimiche; esse andavano preparate sul posto e la fotografia andava fatta prima che l'emulsione si essiccasse. Finché non furono superati questi limiti, solo esperti professionisti potevano fare riprese fotografiche.

Nel 1878, però, un inventore americano, George Eastman, scoprì un nuovo procedimento che consisteva nel miscelare l'emulsione con gelatina, e poi spalmarla sulla lastra; lasciandola essiccare fino a che diventava un gel solido, essa era in grado di mantenere a lungo le sue proprietà. Nel 1884 Eastman brevettò la "pellicola fotografica", ottenuta spalmando il gel in un primo tempo sulla carta, poi, nel 1889, sulla celluloide. Nel 1888 mise a punto la Kodak, una macchina fotografica con cui si scattavano le foto semplicemente premendo un bottone; poi la pellicola esposta poteva essere consegnata per lo sviluppo a un laboratorio. Ora la fotografia poteva diventare un hobby per tutti, e lo divenne. Con il diffondersi di emulsioni sempre più sensibili, ci fu

la possibilità di scattare foto istantanee, e si poterono eliminare le lunghe pose che facevano assumere espressioni stralunate e innaturali.

Si sarebbe pensato che era impossibile semplificare ulteriormente le cose, eppure nel 1947 un inventore americano, Edwin Herbert Land, ideò un apparecchio con un rullino di pellicola a doppio strato, formata da un normale negativo e da carta positiva, tra i quali sono sigillati dei prodotti chimici. Al momento opportuno tali prodotti vengono liberati e sviluppano automaticamente la stampa positiva. Pochi minuti dopo lo scatto, la fotografia è pronta.

Per tutto il diciannovesimo secolo le fotografie erano in bianco e nero, prive di colore. All'inizio del ventesimo secolo il fisico francese, oriundo del Lussemburgo, Gabriel Lippmann inventò un procedimento per la fotografia a colori, per il quale gli fu assegnato il premio Nobel per la fisica del 1908. Tuttavia si trattava di una falsa partenza: solo nel 1936 venne sviluppata una tecnica utilizzabile per la fotografia a colori. Questo secondo, e più fortunato, tentativo era basato sull'osservazione, fatta nel 1855 da Maxwell e von Helmholtz, che qualsiasi colore dello spettro può essere prodotto dalla combinazione di tre sole luci: rossa, verde e blu.

Basandosi su tale principio, la pellicola a colori è composta di tre strati di emulsione - uno sensibile alle componenti verdi dell'immagine, l'altro a quelle rosse e il terzo a quelle blu. Si formano così tre immagini distinte sovrapposte, ciascuna delle quali riproduce l'intensità della luce nella rispettiva porzione dello spettro luminoso analogamente a quanto succede nella fotografia in bianco e nero. Poi la pellicola viene trattata in tre stadi successivi, usando coloranti rossi, blu e verdi per depositare sul negativo i colori appropriati. Ogni punto dell'immagine risulta da una particolare combinazione di rosso, verde e blu, e il cervello interpreta queste combinazioni ricostituendo l'intera gamma dei colori.

Nel 1959, Land propose una nuova teoria della visione dei colori. Il cervello, secondo Land, non ha bisogno di una combinazione di tre colori per avere la sensazione di tutti i colori; bastano due diverse lunghezze d'onda, o insiemi di lunghezze d'onda, una più lunga dell'altra di una data quantità minima. Per esempio, uno dei due insiemi di lunghezze d'onda potrebbe essere l'intero spettro, cioè la luce bianca. Dato che la lunghezza d'onda media della luce bianca è nella regione giallo-verde, essa può fungere da lunghezza d'onda «corta». Ora, un'immagine riprodotta mediante una combinazione di luce bianca e di luce rossa (quest'ultima che funge da lunghezza d'onda «lunga») risulta di tutti i colori. Land ha anche ottenuto fotografie a colori con luce verde e luce rossa filtrate, nonché con altre appropriate combinazioni di due colori.

L'invenzione del cinema deriva da un'osservazione fatta per la prima volta nel 1824 dal medico inglese Peter Mark Roget. Questi notò che le immagini che si formano nell'occhio sono persistenti, cioè durano per qualche frazione di secondo. Dopo l'invenzione della fotografia molti sperimentatori, soprattutto in Francia, sfruttarono questo fatto per creare l'illusione del moto, presentando una serie di immagini in rapida successione. Tutti conosciamo quel giochetto che si fa con una serie di cartoncini illustrati, che, fatti scorrere rapidamente, danno l'impressione di una figura in moto che esegue acrobazie. Una serie di immagini, ciascuna leggermente diversa dalla precedente, che venga rapidamente proiettata su uno schermo a intervalli di circa un sedicesimo di secondo, si fonde in virtù della persistenza delle immagini sulla retina, dando l'impressione di un moto continuo.

Fu Edison a presentare le prime immagini in movimento, facendo una serie di fotografie su una stessa pellicola, che poi fece scorrere velocemente in un proiettore che ne illuminava ciascuna con un lampo.

La prima "pellicola cinematografica" di intrattenimento fu proiettata nel 1894; e, nel 1914, nelle sale cinematografiche si proiettava ormai il lungometraggio "La nascita di una nazione".

Al cinema muto venne aggiunta una "colonna sonora" a partire dal 1927.

Anche la colonna sonora è basata su un effetto ottico: la configurazione delle onde sonore della musica e del parlato viene convertita mediante un microfono in una corrente elettrica modulata, la quale fa accendere una lampadina che viene fotografata mentre si sviluppa l'azione del

film. Quando il film, con questa traccia ottica laterale, viene proiettato sullo schermo, la luminosità della lampada, variabile secondo la configurazione delle onde sonore, viene riconvertita in corrente elettrica mediante una fotocellula che sfrutta l'effetto fotoelettrico, e la corrente viene a sua volta riconvertita in suono.

Due anni dopo l'uscita del primo "film sonoro", "Il cantante di jazz", il cinema muto apparteneva ormai al passato e quasi altrettanto poteva dirsi del teatro di varietà. Verso la fine degli anni trenta venne aggiunto anche il colore, e gli anni cinquanta videro lo sviluppo delle tecniche dello schermo panoramico, nonché un breve periodo di fortuna degli effetti tridimensionali (3D), ottenuti proiettando sullo stesso schermo due immagini: lo spettatore, usando occhiali polarizzatori, vedeva un'immagine distinta con ciascuno degli occhi, il che produceva un effetto stereoscopico.

MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA.

Mentre il cherosene, una frazione del petrolio, cedeva il passo all'elettricità nel campo dell'illuminazione artificiale, una frazione più leggera del petrolio, la benzina, diventava indispensabile per un altro sviluppo tecnologico destinato a rivoluzionare la vita moderna altrettanto a fondo quanto i vari apparecchi elettrici. Si tratta dello sviluppo del "motore a combustione interna", così chiamato perché in tale motore il combustibile viene bruciato dentro al cilindro, in modo che i gas formatisi sospingano direttamente il pistone. Le normali macchine a vapore sono motori a combustione esterna, perché il combustibile viene bruciato all'esterno e il vapore viene successivamente introdotto, appena formato, nel cilindro.

L'AUTOMOBILE.

Questo motore di struttura compatta, nel cui cilindro avvengono piccole esplosioni, ha reso possibile fornire forza motrice a piccoli veicoli, compito per il quale l'ingombrante macchina a vapore non era molto adatta. Certamente «carrozze senza cavalli» azionate dal vapore erano già state ideate nel 1786, allorché William Murdock, che più tardi avrebbe introdotto l'illuminazione a gas, ne costruì una. Un secolo dopo, l'inventore americano Francis Edgar Stanley inventò la famosa «vaporiera di Stanley», che per un certo tempo fu in competizione con i primi veicoli muniti di motore a combustione interna. Il futuro, però, era di questi ultimi.

In realtà alcuni motori a combustione interna erano stati costruiti all'inizio del diciannovesimo secolo, prima che il petrolio entrasse nell'uso comune. Come carburante, essi bruciavano vapori di trementina o idrogeno. Ma fu solo con la benzina, l'unico liquido che produce vapore ed è al tempo stesso combustibile e ottenibile in grandi quantità, che il motore a combustione interna poté diventare qualcosa di più di una semplice curiosità.

Il primo motore a combustione interna utilizzabile in pratica fu costruito nel 1860 da un inventore francese, Etienne Lenoir, che lo applicò a un piccolo veicolo divenuto la prima «carrozza senza cavalli» di questo genere. Nel 1876 l'ingegnere tedesco Nikolaus August Otto, avendo avuto notizia del motore di Lenoir, costruì un "motore a quattro tempi". Un pistone che scorre a tenuta in un cilindro viene spinto verso il basso, e risucchia nel cilindro una miscela di benzina e aria; poi il pistone viene di nuovo spinto verso l'alto e comprime il vapore. Al punto di massima compressione il vapore viene acceso ed esplode. L'esplosione spinge il pistone verso il basso, ed è questa fase attiva a far funzionare il motore, che fa girare una ruota, la quale a sua volta sospinge nuovamente il pistone verso l'alto nel cilindro, espellendo i residui della combustione, o "gas di scarico" - quarto e ultimo stadio del ciclo. A questo punto, la ruota, agendo da volano, spinge il pistone in basso e il ciclo ricomincia.

Un ingegnere scozzese, Dugald Clerk, introdusse quasi subito un miglioramento: egli collegò un secondo cilindro, in modo che il suo pistone fosse nella fase attiva mentre l'altro era nella fase morta di scarico; era così assicurata una erogazione d'energia più costante. In seguito

l'aggiunta di altri cilindri (oggi in genere i cilindri vanno da 4 a 8) aumentò la regolarità e la potenza del "motore alternativo".

Questo genere di motore era indispensabile per avere delle automobili utilizzabili nella pratica; tuttavia occorrevano ancora alcune invenzioni ausiliarie. L'accensione della miscela benzina-aria al momento giusto costituiva un problema. Vennero adottati espedienti ingegnosi di ogni sorta, ma nel 1923 divenne di uso comune un sistema basato sull'elettricità: quest'ultima viene fornita da una "batteria", che, come tutti i sistemi del genere, fornisce elettricità prodotta da una reazione chimica; essa, però, può essere ricaricata inviando una corrente elettrica in direzione opposta alla scarica, in modo da invertire la reazione chimica e da poter ottenere poi altra elettricità. La corrente inversa è fornita da un piccolo generatore azionato dal motore stesso.

Il tipo più comune di batteria ricaricabile è formato da piastre alternate di piombo e ossido di piombo, immerse in una soluzione di acido solforico abbastanza concentrato. La batteria fu inventata dal fisico francese Gaston Planté nel 1859 e perfezionata nel 1881 dall'ingegnere elettrotecnico americano Charles Francis Brush. In seguito sono state inventate batterie più resistenti e più compatte - per esempio quella a nichel-ferro ideata da Edison verso il 1905 - ma dal punto di vista economico nessuna può competere con la batteria al piombo.

L'energia fornita dalla batteria viene immagazzinata nel campo magnetico di un trasformatore, chiamato "bobina d'induzione", e la caduta di questo campo fornisce il brusco incremento di tensione che provoca la scintilla di accensione tra gli elettrodi della ben nota candela.

Una volta che un motore a combustione interna si è messo in moto, seguiterà a girare per inerzia tra uno scoppio e l'altro. Ma per metterlo in moto occorre fornire energia dall'esterno. All'inizio esso veniva messo in moto a mano (mediante la manovella); i fuoribordo e i tosaerba vengono ancora oggi avviati a strappo con una corda. La manovella richiedeva una notevole forza; e quando il motore si avviava capitava che la manovella sfuggisse di mano, girasse e rompesse il braccio del malcapitato manovratore. Nel 1912 l'inventore americano Charles Franklin Kettering inventò un dispositivo di "avviamento automatico", che eliminava finalmente la manovella. Esso è azionato dalla batteria, che fornisce l'energia per i primi giri del motore.

Le prime automobili funzionanti furono costruite, indipendentemente, nel 1885 dagli ingegneri tedeschi Gottlieb Daimler e Karl Benz. Ma quello che ne fece veramente un veicolo diffuso fu l'avvento della "produzione in serie".

Il primo a ideare questa tecnica fu Eli Whitney, che merita maggior riconoscimento per questo che per la sua invenzione più famosa, quella della sgranatrice di cotone. Nel 1789, Whitney ottenne dal governo federale una commessa di fucili per l'esercito; fino ad allora, i fucili erano stati fabbricati uno per uno, mettendo insieme pezzi singoli. Whitney ebbe l'idea di costruire pezzi uniformi, in modo che ciascuno andasse bene per qualsiasi fucile. Quest'unica, semplice innovazione - fabbricare pezzi standard, intercambiabili per un dato tipo di articolo - è forse il fattore che maggiormente ha contribuito alla nascita della moderna industria basata sulla produzione in serie.

Quando si ebbero a disposizione macchine utensili, fu possibile stampare pezzi standard in numero praticamente illimitato.

Fu l'ingegnere americano Henry Ford che per primo sfruttò fino in fondo la nuova idea. Egli aveva costruito la prima automobile (a due cilindri) nel 1892; poi, nel 1899, era passato a lavorare come direttore tecnico per la Detroit Automobile Company. Questa industria intendeva produrre automobili fuori serie, ma Ford aveva in mente qualcos'altro. Nel 1902 diede le dimissioni e si mise a produrre automobili in proprio su vasta scala. Nel 1909, cominciò a sfornare il Modello T; e nel 1913 cominciò a fabbricarlo secondo il sistema di Whitney - automobile dopo automobile, ognuna esattamente uguale a quella precedente, e tutte fatte di parti uguali.

Ford comprese di poter accelerare la produzione usando l'uomo come venivano usate le macchine, cioè facendo ripetere a ciascuno la stessa operazione parcellizzata in continuazione, con regolarità. L'inventore americano Samuel Colt (che aveva inventato la rivoltella, la «sei colpi»)

aveva fatto i primi passi in questa direzione nel 1847; e l'industriale Ransom E. Olds aveva applicato il sistema all'automobile nel 1900. Tuttavia Olds perse l'appoggio dei suoi finanziatori, e toccò a Ford cogliere i frutti di questa intuizione. Ford istituì la "catena di montaggio", in cui ciascun operaio aggiungeva un pezzo al prodotto quando questo gli passava davanti su un nastro trasportatore, finché, alla fine della catena, usciva l'automobile completa. Con questo sistema si conseguivano due vantaggi economici: alti salari per gli operai e automobili che si potevano vendere a prezzi incredibilmente bassi.

Nel 1913, Ford fabbricava mille Modello T al giorno. Prima dell'interruzione della produzione, nel 1927, ne erano stati messi in commercio 15 milioni e il prezzo era sceso a 290 dollari. Poi ebbe il sopravvento la mania di cambiare modello ogni anno e Ford fu costretto ad adeguarsi allo sfoggio di varietà e novità superficiali che fece salire enormemente i prezzi delle automobili e fece perdere agli americani gran parte dei vantaggi della produzione in serie.

Nel 1892, l'ingegnere meccanico tedesco Rudolf Diesel introdusse una modifica del motore a combustione interna, che lo rese più semplice e più economico quanto a combustibile. Egli sottopose a forte pressione la miscela aria-carburante, in modo che bastasse il calore della compressione a causare l'accensione. Il "motore diesel" consentì l'utilizzo di frazioni di petrolio a più alto punto di ebollizione, che non sono detonanti. A causa dell'elevata compressione, il motore doveva essere più solido; pertanto il motore diesel è considerevolmente più pesante di quello a benzina. Ma quando, negli anni venti, fu ideato un sistema conveniente di iniezione del combustibile, il motore diesel cominciò a essere preferito per camion, trattori, autobus, navi e locomotive, e oggi è l'indiscusso re del trasporto pesante.

Miglioramenti nella composizione della stessa benzina aumentarono ulteriormente il rendimento del motore a combustione interna. La benzina è una miscela complessa di molecole costituite da atomi di carbonio e di idrogeno ("idrocarburi"), alcune delle quali bruciano più rapidamente di altre. È controproducente una combustione troppo rapida, perché farebbe esplodere la miscela aria-benzina in troppi punti contemporaneamente, producendo la "detonazione nel motore". Una combustione più lenta produce un'espansione uniforme del vapore, che dà al pistone una spinta regolare ed efficace.

L'intensità di detonazione prodotta da una data benzina è misurata dal "numero di ottano"; questo è ottenuto prendendo come riferimento l'"iso-ottano", un idrocarburo che è molto lento a produrre la detonazione, misto a eptano, che è invece molto rapido. Una delle ragioni principali - fra molte altre - per cui si raffina la benzina è proprio quella di ottenere una miscela di idrocarburi con un alto numero di ottano.

I motori per le automobili sono stati progettati nel corso degli anni con un "rapporto di compressione" sempre più elevato: cioè la miscela aria-benzina viene compressa a densità sempre maggiori prima dell'accensione; si ha così una maggiore potenza, ma anche una maggiore tendenza alla detonazione; è per questo che si sono dovute sviluppare benzine con numero di ottano sempre maggiore.

Il compito è stato facilitato dal ricorso a prodotti chimici che, se aggiunti in piccole quantità alla benzina, fungono da antidetonanti.

Tra questi il più efficace è il "piombo tetraetile", un composto del piombo le cui proprietà furono individuate dal chimico americano Thomas Midgley, e che fu utilizzato per la prima volta a questo scopo nel 1925. La benzina che lo contiene è "benzina al piombo", o "benzina etilata". Se il piombo tetraetile fosse presente da solo, gli ossidi di piombo che si formerebbero durante la combustione sporcherebbero e guasterebbero il motore; per tale ragione si aggiunge anche etilbromuro: l'atomo metallico del piombo tetraetile si combina con l'atomo di bromo dell'etilbromuro formando bromuro di piombo, il quale, alla temperatura a cui brucia la benzina, vaporizza e viene espulso con i gas di scarico.

Il ritardo nell'accensione dopo la compressione, nei combustibili per motori diesel (un ritardo eccessivo è indesiderabile), è valutato per confronto con quello del "cetano" (o n-

esadecano), un idrocarburo che contiene sedici atomi di carbonio nella sua molecola, contro gli otto dell'iso-ottano. Pertanto si parla di "numero di cetano", a proposito dei combustibili diesel.

I progressi non sono finiti. Nel 1923, arrivarono i pneumatici a bassa pressione, all'inizio degli anni cinquanta quelli senza camera d'aria, che resero più rari gli scoppi. Negli anni quaranta le automobili ebbero il condizionamento dell'aria, ed entrò nell'uso il cambio automatico, che sostituì quello manuale. Negli anni cinquanta arrivarono il servosterzo e il servofreno. L'automobile è diventata a tal punto parte integrante del modo di vivere di ogni giorno che, nonostante l'alto costo della benzina e il crescente pericolo di inquinamento, non sembra proprio che ci sia alcun modo di liberarsene, a meno che non intervenga una catastrofe universale.

L'AEROPLANO.

Versioni più grandi dell'automobile furono gli autobus e i camion; il petrolio sostituì il carbone sulle grandi navi, ma il massimo trionfo del motore a combustione interna doveva venire dall'aria. Nell'ultimo decennio dell'Ottocento, gli uomini avevano realizzato il vecchio sogno di volare - un sogno più vecchio di Dedalo e di Icaro. Il volo a vela era ormai uno sport che contava i suoi appassionati. Il primo "aliante" in grado di portare un uomo a bordo fu costruito nel 1853 dall'inventore inglese George Cayley. In realtà trasportava non proprio un uomo, ma un ragazzo. Il primo vero professionista di questo tipo di impresa sportiva, l'ingegnere tedesco Otto Lilienthal, morì nel 1896 durante un volo in aliante. Nel frattempo si era fatta sempre più intensa l'aspirazione a decollare con un apparecchio a motore, anche se l'aliante è rimasto fino a oggi uno sport molto praticato.

Il fisico e astronomo americano Samuel Pierpont Langley tentò, nel 1902 e nel 1903, di volare con un aliante munito di un motore a combustione interna e fu a un pelo dal riuscire nella sua impresa; se non gli fossero mancati a un certo punto i soldi, prima o poi probabilmente ci sarebbe riuscito. Le cose andarono diversamente e l'onore toccò ai fratelli Orville e Wilbur Wright, fabbricanti di biciclette che si dedicavano all'aliante come hobby.

Il 17 dicembre 1903, a Kitty Hawk nella Carolina del Nord, i fratelli Wright si staccarono dal suolo su un aliante spinto da un'elica e restarono in aria per 59 secondi, volando per 260 metri. Fu il primo volo in aeroplano della storia, ma passò quasi del tutto inosservato.

Molto maggior interesse suscitarono i fratelli Wright quando volarono per 40 chilometri e più e l'ingegnere francese Louis Blériot quando, nel 1909, attraversò la Manica in aeroplano. Le battaglie aeree e le imprese aviatorie della prima guerra mondiale eccitarono ancora di più l'immaginazione; e i "biplani" di quei tempi, con le loro due ali tenute precariamente insieme da montanti e cavi, divennero familiari a un'intera generazione postbellica di frequentatori di cinema.

L'ingegnere tedesco Hugo Junkers progettò con successo un "monoplano" subito dopo la guerra; e la spessa ala singola, senza montanti, prese il sopravvento. L'ingegnere russo-americano Igor Ivan Sikorsky nel 1939 costruì un aereo a più motori e progettò il primo "elicottero", un aereo munito di pale nella parte superiore, che poteva decollare e atterrare verticalmente e anche star fermo in volo.

Tuttavia, nei primi anni venti, l'aeroplano era ancora più o meno una curiosità - solo un nuovo e più terribile strumento di guerra, oppure un oggetto di svago per spericolati e gente alla ricerca del brivido.

L'anno di nascita dell'aviazione, nel significato attuale del termine, fu però il 1927, allorché Charles Augustus Lindbergh compì un volo senza scalo da New York a Parigi. Il mondo impazzì di entusiasmo per la sua impresa, ed ebbe inizio lo sviluppo di aerei più grandi e più sicuri.

Due importanti innovazioni furono introdotte nel propulsore degli aerei dopo che questi ebbero assunto il ruolo di mezzi di trasporto: la prima fu l'adozione del motore a turbina, nel quale i vapori ad altissima temperatura della combustione, espandendosi, mettevano in moto una girante esercitando una pressione sulle sue palette, anziché spingere i pistoni nei cilindri. Ne derivava un

motore più semplice ed economico, meno esposto a guasti; l'unico problema da risolvere era quello di trovare delle leghe adatte a sostenere le alte temperature dei gas; leghe con tale caratteristica furono realizzate nel 1939, dopo di che gli "aerei a turboeliche", che usavano un motore a turbina per azionare l'elica, si diffusero sempre più.

Ciononostante la loro vita fu breve, almeno per quanto riguarda i lunghi voli, perché furono ben presto sostituiti dalla seconda innovazione importante: "l'aereo a reazione", o jet. Qui la forza motrice è, in linea di principio, la stessa che fa sfrecciare in avanti un palloncino allorché se ne apre l'imboccatura lasciando fuoriuscire l'aria. Il principio in gioco è quello di azione e reazione: il moto in una data direzione dell'aria che si espande uscendo dal palloncino suscita un moto, o una spinta, uguale nella direzione opposta - così come il moto in avanti della pallottola di un fucile provoca il rinculo. Nel motore a reazione la combustione del carburante produce gas molto caldi e ad alta pressione, che spingono in avanti l'aereo con gran forza uscendo dallo scarico in direzione opposta. Anche un razzo si muove in base allo stesso principio, salvo che deve portare con sé una riserva di ossigeno per bruciare il combustibile.

Brevetti per la "propulsione a reazione" erano stati depositati dall'ingegnere francese René Lorin fin dal 1913; ma a quell'epoca essi costituivano un progetto del tutto inapplicabile agli aeroplani. La propulsione a reazione è economica soltanto a velocità superiori ai 650 chilometri all'ora. Nel 1939 un inglese, Frank Whittle, fece volare un aereo a reazione abbastanza ben funzionante; nel gennaio del 1944, infine, aerei a reazione furono messi in campo durante la guerra dalla Gran Bretagna e dagli Stati Uniti contro le "bombe volanti", le V-1 tedesche, aeromobili senza pilota che portavano nel muso l'esplosivo.

Dopo la seconda guerra mondiale furono costruiti jet militari che raggiungevano una velocità vicina a quella del suono; quest'ultima dipende dall'elasticità naturale delle molecole dell'aria, cioè dalla loro capacità di spostarsi avanti e indietro. Quando un aereo si avvicina a tale velocità, le molecole dell'aria non riescono, per così dire, a togliersi di mezzo e restano compresse davanti all'aereo, che di conseguenza viene sottoposto a sforzi e tensioni di ogni genere. A questo fenomeno si alludeva con l'espressione "barriera del suono", come se esistesse qualcosa di materiale a cui non ci si potesse avvicinare senza pericolo di distruzione. I test effettuati nelle gallerie del vento consentirono però di migliorare l'aerodinamica dei velivoli, così che il 14 ottobre 1947 un aereo razzo X-1 americano, pilotato da Charles Elwood Yeager, «infranse la barriera del suono».

Per la prima volta nella storia un essere umano aveva superato la velocità del suono. Le battaglie aeree nella guerra di Corea, all'inizio degli anni cinquanta, furono combattute da aerei a reazione che si spostavano a velocità tali che furono relativamente pochi quelli abbattuti.

Il rapporto tra la velocità di un oggetto e la velocità del suono (che è di 1190 chilometri all'ora nell'aria a 0 gradi C) nel mezzo in cui l'oggetto si sposta è chiamato "numero di Mach", dal nome del fisico austriaco Ernst Mach, che fu il primo a studiare teoricamente, verso la metà del diciannovesimo secolo, le conseguenze del moto a tali velocità. Negli anni sessanta, le velocità degli aerei erano superiori a Mach 5, cosa resa possibile dall'aereo sperimentale X-15, i cui razzi lo spingevano per brevi periodi di tempo così in alto da consentire ai piloti di considerarsi astronauti. Gli aerei militari viaggiano a velocità inferiori, e quelli commerciali a velocità ancora più basse.

Un aereo che si muove a "velocità supersonica" (superiore a Mach 1) spinge le sue onde sonore dinnanzi a sé, perché viaggia più veloce di loro. Se l'aereo si trova a bassa quota, il cono delle onde d'urto può raggiungere il suolo e provocare il ben noto e caratteristico "bang". (Lo schiocco di una frusta è anch'esso un bang sonico in miniatura perché, se si maneggia la frusta opportunamente, il suo apice può raggiungere una velocità supersonica.)

Il volo supersonico commerciale fu inaugurato negli anni settanta dall'anglo-francese Concorde, capace di attraversare l'Atlantico in tre ore, viaggiando a velocità doppia di quella del suono. Una versione americana di aereo S.S.T. ("aeromobile supersonico da trasporto") abortì nel 1971, a causa di polemiche sui rumori eccessivi prodotti negli aeroporti e sulla possibilità di danni all'ambiente. È stato messo in rilievo da alcuni il fatto che questa è stata la prima volta che un

progresso tecnologico fattibile non è stato realizzato perché è apparso non desiderabile, la prima volta che gli esseri umani hanno detto: «Potremmo, ma preferiamo non farlo».

In complesso, probabilmente è stato un bene, perché a quanto pare i vantaggi non giustificavano i costi. Il Concorde è stato un fallimento dal punto di vista economico[1], e il programma S.S.T. sovietico è stato compromesso quando uno di tali aerei si è schiantato a terra durante un'esibizione a Parigi, nel 1973.

ELETTRONICA.

LA RADIO.

Nel 1888, Heinrich Hertz condusse il famoso esperimento che rivelò le onde radio, la cui esistenza era stata prevista venti anni prima da James Clerk Maxwell (vedi capitolo ottavo). Una corrente alternata ad alta tensione provocava una sovratensione transitoria prima in una sferetta metallica, poi in una seconda, separate da una piccola intercapedine di aria. Ogni volta che il potenziale raggiungeva un massimo in una direzione o nell'altra, scoccava una scintilla fra le due sferette; le equazioni di Maxwell prevedevano che, in una situazione di questo genere, si sarebbe prodotta una radiazione elettromagnetica. Hertz usò un rivelatore formato da una semplice spira metallica interrotta in un punto, per rivelare la presenza di tale energia. Come la corrente dava origine a una radiazione nel primo circuito, così la radiazione avrebbe dovuto dar origine a una corrente nel circuito rivelatore. Infatti Hertz poté scorgere piccole scintille che saltavano fra i due terminali del rivelatore, situato dalla parte opposta della stanza rispetto alla bobina che emetteva la radiazione.

L'energia era stata dunque trasmessa attraverso lo spazio.

Spostando il rivelatore in punti diversi della stanza, Hertz riuscì a determinare la forma delle onde. Dove le scintille erano forti e brillanti, le onde erano a un massimo o a un minimo. Nei punti in cui non si produceva alcuna scintilla, doveva esserci un nodo delle onde; in tal modo egli poté calcolare la lunghezza d'onda della radiazione e scoprì che si trattava di onde enormemente più lunghe di quelle della luce.

Nel decennio successivo varie persone compresero che era possibile usare le onde hertziane per trasmettere messaggi da un luogo a un altro, perché le onde erano abbastanza lunghe da aggirare gli ostacoli. Nel 1890, il fisico francese Edouard Branly costruì un rivelatore più avanzato, sostituendo alla spira metallica un tubo di vetro pieno di limatura metallica a cui erano collegati dei fili e una batteria. La limatura non lasciava passare la corrente della batteria se non vi si induceva una corrente alternata ad alta tensione, proprio come avveniva con le onde hertziane. Con questo ricevitore Branly poté rivelare la presenza di onde hertziane alla distanza di quasi 150 metri. In seguito il fisico inglese Oliver Joseph Lodge (che più tardi si conquistò una dubbia fama come paladino dello spiritualismo) modificò questo apparecchio riuscendo a captare segnali a una distanza di quasi un chilometro e a inviare messaggi in alfabeto Morse.

L'inventore italiano Guglielmo Marconi scoprì che si potevano migliorare ulteriormente le cose collegando un lato del generatore e del ricevitore a terra e l'altro a un filo metallico, che fu poi chiamato "antenna" (suppongo per la sua somiglianza con quella di un insetto). Usando generatori molto potenti, Marconi riuscì, nel 1896, a inviare segnali a una distanza di una quindicina di

[1] A dieci anni dal suo primo volo (21 gennaio 1976) il Concorde è diventato economicamente attivo. Causa principale di questa inversione di tendenza è stata l'acquisizione di nuove rotte transatlantiche e il calo del prezzo del greggio. [N.d. R.]

chilometri, nel 1898, a far loro attraversare la Manica e, nel 1901, l'Atlantico. Era così nato il cosiddetto telegrafo senza fili, o, come si disse poi, la "radiotelegrafia", o in breve la "radio".

Marconi elaborò un sistema per eliminare dai segnali le "scariche statiche" (o disturbi) e per sintonizzarsi solo sulle lunghezze d'onda emesse dal trasmettitore. Per le sue invenzioni Marconi condivise il premio Nobel per la fisica nel 1909 con il fisico tedesco Karl Ferdinand Braun, che aveva contribuito allo sviluppo della radio mostrando che certi cristalli lasciano passare la corrente in una sola direzione; si poteva così convertire la normale corrente alternata in corrente continua, come era necessario per la trasmissione radio. I cristalli avevano un comportamento discontinuo, e nel primo decennio del secolo la gente passava ore china sui "ricevitori a galena" nel tentativo di captare i segnali.

Il fisico americano Reginald Aubrey Fessenden progettò un generatore speciale di correnti alternate ad alta frequenza (che permetteva di fare a meno del generatore a scintilla) e ideò un sistema per "modulare" l'onda radio in modo che essa trasportasse una configurazione che riproduceva l'onda sonora. Quello che veniva modulato era l'ampiezza (o altezza) delle onde; di conseguenza questo sistema prese il nome di "modulazione di ampiezza", e oggi è noto come "radio A.M.". La vigilia di Natale del 1906 per la prima volta un ricevitore radio emise della musica e delle parole.

I primi entusiasti della radio dovevano star vicini al loro apparecchio, portando una cuffia. Occorreva "amplificare" il segnale, cioè rinforzarlo, e il mezzo lo fornì una scoperta che era stata fatta da Edison - la sua unica scoperta di scienza «pura».

Nel 1883, in uno dei suoi esperimenti volti a migliorare la lampadina elettrica, Edison sigillò un filo metallico all'interno del bulbo vicino al filamento incandescente e notò con sorpresa che l'elettricità passava dal filamento incandescente al filo metallico attraverso l'aria interposta. Dato che questo fenomeno non aveva alcuna utilità per i suoi scopi, Edison, da quell'uomo pratico che era, si limitò ad annotarlo nel suo taccuino e se ne dimenticò. Ma l'"effetto Edison" assunse un'importanza davvero grande quando si scoprì l'elettrone e fu chiaro che una corrente che attraversa uno spazio vuoto significa un flusso di elettroni. Il fisico inglese Owen Willans Richardson mostrò, in esperimenti condotti tra il 1900 e il 1903, che gli elettroni «evaporano» fuoriuscendo dai filamenti metallici riscaldati nel vuoto. Per le sue ricerche egli ricevette il premio Nobel per la fisica del 1928.

Nel 1904, l'ingegnere elettrotecnico inglese John Ambrose Fleming applicò brillantemente l'effetto Edison, ponendo in un bulbo, intorno al filamento, una piastrina di metallo cilindrica (detta "placca"), che poteva comportarsi in due modi: se era carica positivamente, attraeva gli elettroni che «evaporavano» dal filamento riscaldato, creando un circuito in cui passava corrente elettrica; ma se la placca era carica negativamente, respingeva gli elettroni, impedendo il passaggio della corrente. Supponiamo ora di collegare alla placca una sorgente di corrente alternata: quando questa scorre in una direzione, la placca si carica positivamente e lascia passare la corrente nel tubo; quando la direzione della corrente alternata si inverte, la placca si carica negativamente e nel tubo non passa corrente. Pertanto la placca lascia passare corrente in una sola direzione; in pratica, converte una corrente alternata in corrente continua. Dato che un siffatto congegno funge da valvola rispetto al passaggio della corrente, esso viene chiamato, logicamente, "valvola" (anche se talora la si chiama, piuttosto impropriamente, tubo); gli scienziati l'hanno definita "diodo", a causa dei due elettrodi - il filamento e la placca.

La "valvola elettronica" (o "tubo elettronico a vuoto"), usata all'inizio soprattutto nella radio, controlla il passaggio di elettroni nel vuoto anziché quello di una corrente elettrica in un filo. Gli elettroni possono essere controllati in modo molto più sensibile della corrente, per cui le valvole (e tutti i loro derivati) aprirono la via a innumerevoli nuovi congegni elettronici capaci di svolgere compiti impossibili per un semplice congegno elettrico. Lo studio e l'utilizzazione delle valvole elettroniche e dei loro derivati ha preso il nome di "elettronica".

Nella sua forma più semplice, la valvola elettronica funge da rettificatore e, essendo molto più affidabile, ha sostituito i cristalli usati in precedenza. Nel 1907, l'inventore americano Lee De Forest fece un ulteriore passo avanti, inserendo un terzo elettrodo nel tubo, cioè facendone un "triodo". Il terzo elettrodo consiste in una piastrina forata ("griglia") posta tra il filamento e la placca.

La griglia attrae gli elettroni e ne accelera il flusso dal filamento alla placca (attraverso i fori). Basta un piccolo aumento della carica positiva della griglia a produrre un forte aumento del flusso degli elettroni; di conseguenza anche la piccola carica aggiunta da deboli segnali radio farà aumentare di molto il flusso di corrente; tale corrente rispecchierà tutte le variazioni provocate dalle onde radio.

Il triodo, insomma, funge da amplificatore. I triodi, e altre modificazioni del tubo elettronico ancora più complesse, sono diventati essenziali, non solo per gli apparecchi radio, ma per tutti i tipi di apparecchiature elettroniche.

Per assicurare alla radio la massima diffusione occorreva fare ancora un passo avanti. Durante la prima guerra mondiale l'ingegnere elettrotecnico americano Edwin Howard Armstrong progettò un apparecchio che abbassava la frequenza delle onde radio, cosa che all'epoca aveva lo scopo di avvistare gli aerei, ma che, dopo la guerra, trovò un'altra applicazione nelle radio. Il "ricevitore a supereterodina" di Armstrong rese possibile sintonizzarsi distintamente con una data frequenza semplicemente girando una manopola, mentre prima era un'impresa abbastanza difficoltosa regolare la ricezione entro una gamma piuttosto vasta di frequenze possibili.

Nel 1921, una stazione di Pittsburgh istituì per la prima volta dei regolari programmi radio. Altre stazioni seguirono in rapida successione; e con la possibilità di regolare il volume e di sintonizzarsi su una data stazione solo girando una manopola, gli apparecchi radio si diffusero enormemente. Nel 1927, divenne possibile parlare per telefono attraverso l'oceano con l'aiuto della radio: la "telefonia senza fili" era ormai un fatto compiuto.

Restava il problema delle scariche statiche. I sistemi di sintonizzazione introdotti da Marconi e dai suoi successori minimizzavano il «rumore» provocato da disturbi atmosferici e da altre sorgenti elettriche, ma non li eliminavano del tutto. Fu ancora Armstrong che trovò la soluzione. Nel 1935, alla modulazione di ampiezza, che era soggetta a interferenze da parte di modulazioni di ampiezza casuali, egli sostituì la "modulazione di frequenza": cioè, mantenne costante l'ampiezza dell'onda radio portante e le sovrappose una variazione di frequenza; se l'onda sonora aveva una grande ampiezza, si rendeva bassa la frequenza dell'onda portante, e viceversa. La modulazione di frequenza ("F.M.") in pratica eliminò le scariche statiche; dopo la seconda guerra mondiale la modulazione di frequenza venne adottata soprattutto per i programmi di musica classica.

LA TELEVISIONE.

La televisione fu un inevitabile sviluppo della radio, così come il cinema sonoro fu la continuazione naturale del cinema muto. Il precursore tecnico della televisione fu la trasmissione di immagini mediante filo, il che implicava di tradurre un'immagine in una corrente elettrica. Un sottile pennello di luce attraversava l'immagine su una pellicola fotografica raggiungendo un tubo fotoelettronico posto dietro a essa; dove la pellicola era relativamente opaca, si generava nel tubo una debole corrente mentre là dove era più chiara si formava una corrente più intensa. Il pennello luminoso analizzava rapidamente l'immagine da sinistra a destra, riga per riga, producendo una corrente variabile che rappresentava tutta quanta l'immagine. Tale corrente veniva trasmessa via filo, e a destinazione riproduceva l'immagine su una pellicola, invertendo il processo. Queste foto trasmesse via filo (telefoto) già nel 1907 viaggiavano tra Parigi e Londra.

La televisione è la trasmissione, anziché di una fotografia ferma, di un immagine in movimento - presa dal vivo o da un film. La trasmissione deve essere estremamente veloce, il che

significa che l'azione va analizzata molto rapidamente; la distribuzione dei chiari e degli scuri dell'immagine viene convertita in una distribuzione di impulsi elettrici mediante una fotocamera che usa, al posto della pellicola, un rivestimento di metallo che emette elettroni quando è colpito dalla luce.

Qualcosa di simile alla televisione fu esibito per la prima volta nel 1926 dall'inventore scozzese John Logie Baird. Tuttavia, la prima telecamera (apparecchio da ripresa televisiva) funzionante fu l'"iconoscopio", brevettato nel 1938 dall'inventore americano di origine russa Vladimir Kosma Zworykin. Nell'iconoscopio la parte posteriore dell'apparecchio è rivestita di un gran numero di minuscole goccioline di cesio-argento, ciascuna delle quali emette elettroni, quando il pennello luminoso la colpisce, proporzionalmente alla intensità della luce. Più tardi l'iconoscopio fu sostituito dall'"orticonoscopio", un perfezionamento in cui il rivestimento di cesio-argento è tanto sottile da permettere agli elettroni emessi di procedere fino a raggiungere una sottile lastra di vetro che emette ancora più elettroni. Questa amplificazione aumenta la sensibilità della telecamera alla luce, eliminando la necessità di una forte illuminazione.

Il ricevitore televisivo è una varietà di tubo a raggi catodici. Un fascio di elettroni emessi da un filamento ("cannone elettronico") colpisce uno schermo rivestito di una sostanza fluorescente, che brilla in proporzione all'intensità del fascio. Coppie di elettrodi, controllando la direzione del fascio, fanno in modo che esso effettui la scansione di tutto lo schermo da destra a sinistra in una serie di centinaia di righe orizzontali, ciascuna immediatamente sotto la precedente; l'intera scansione dell'immagine contenuta sullo schermo viene effettuata in questo modo in un trentesimo di secondo. Il pennello elettronico procede a «dipingere» le immagini successive alla velocità di trenta al secondo. In nessun istante sullo schermo è attivato più di un punto (luminoso o oscuro, a seconda dei casi), eppure, grazie alla persistenza retinica, noi vediamo non solo delle immagini complete, ma addirittura una sequenza ininterrotta di movimenti e di azione.

Trasmissioni televisive a livello sperimentale ebbero inizio negli anni venti, ma l'utilizzo commerciale della televisione dovette attendere fino al 1947; a partire da tale data, essa ha praticamente monopolizzato il campo dello spettacolo e dell'intrattenimento.

Verso la metà degli anni cinquanta vennero introdotte due migliorie: venne introdotta la televisione a colori, ottenuta ponendo nello schermo tre tipi di materiali fluorescenti predisposti perché reagissero rispettivamente al verde, al rosso e al blu; e la "videoregistrazione", un tipo di registrazione su nastro abbastanza simile alla colonna sonora dei film, che consentì di riprodurre programmi o eventi registrati con una qualità migliore di quella che si otteneva passando attraverso una pellicola cinematografica.

IL TRANSISTOR.

Negli anni ottanta il mondo è entrato nell'"era della cassetta". Cassette di piccole dimensioni in cui il nastro può essere avvolto avanti e indietro riproducendo musica ad alta fedeltà - magari in apparecchi a pila, in modo che la gente possa andarsene in giro o fare i lavori di casa tenendosi la cuffia in testa e ascoltando suoni che gli altri non possono sentire - invasero il mercato, ben presto seguite dalle "videocassette", che consentono di vedere sul proprio piccolo schermo un film o un programma televisivo precedentemente registrati.

La valvola elettronica, il cuore di tutti gli apparecchi elettronici, finì per diventare un fattore limitante; solitamente le parti che compongono un apparecchio vengono perfezionate gradualmente con il tempo, nel senso che acquistano maggiore efficienza e maggiore flessibilità e riducono le loro dimensioni e la loro massa, processo che talora viene chiamato "miniaturizzazione". La valvola elettronica, invece, diventò una strozzatura sulla via della miniaturizzazione, perché doveva restare abbastanza grande da contenere un notevole volume di vuoto, se non si voleva che tra i vari componenti al suo interno passasse indebitamente elettricità, essendo essi troppo poco distanziati.

Aveva anche altri difetti: poteva rompersi o «perdere», diventando inutilizzabile. (Nei primi apparecchi radiofonici e televisivi i tubi venivano sostituiti continuamente; soprattutto per i televisori, sembrava quasi indispensabile la presenza costante di un addetto alle riparazioni.) Inoltre le valvole non entravano in funzione finché i filamenti non si erano riscaldati a sufficienza, il che richiedeva il passaggio di una notevole quantità di corrente; e ci voleva del tempo perché l'apparecchio «si scaldasse». Poi, del tutto inaspettatamente, saltò fuori una soluzione. Negli anni quaranta vari scienziati dei Bell Telephone Laboratories si misero a studiare i cosiddetti "semiconduttori", cioè dei materiali, come il silicio e il germanio, che conducono l'elettricità solo parzialmente: si voleva capire la ragione di questo fenomeno. I ricercatori dei Bell Lab scoprirono che si poteva accrescere la conducibilità miscelando tracce di impurità con i materiali semiconduttori.

Consideriamo il caso di un cristallo di germanio puro: ogni atomo ha quattro elettroni nel suo strato più esterno, ciascuno dei quali, nell'ordinato reticolo cristallino, si accoppia con un elettrone di un atomo di germanio contiguo, così che tutti gli elettroni si trovano accoppiati in legami stabili. Questa disposizione è simile a quella del diamante; per questo il germanio, il silicio e altre sostanze analoghe vengono detti "adamantini".

Se si introduce una piccola quantità di arsenico in questa disposizione cosiddetta adamantina, le cose si complicano: l'arsenico ha cinque elettroni nel suo strato esterno; un atomo di arsenico che sostituisca un atomo di germanio nel cristallo potrà accoppiare quattro dei suoi cinque elettroni con gli atomi vicini, ma il suo quinto elettrone non troverà un compagno e resterà libero. Se ora si applica una tensione elettrica a questo cristallo, l'elettrone non legato si muoverà, dirigendosi verso l'elettrodo positivo. Il suo moto non sarà altrettanto libero quanto quello degli elettroni in un conduttore; purtuttavia il cristallo condurrà l'elettricità meglio di un nonconduttore, come lo zolfo o il vetro.

Fin qui nulla di molto sorprendente; ma ora consideriamo un caso più singolare. Aggiungiamo al germanio un po' di boro anziché di arsenico: l'atomo del boro ha nello strato più esterno solo tre elettroni, i quali possono accoppiarsi con gli elettroni di tre atomi di germanio; che ne sarà dell'elettrone del quarto atomo di germanio contiguo al boro? Esso si accoppierà con un buco! Il termine «buco» - in realtà quello tecnico è «lacuna» - è appropriato; infatti il luogo in cui l'elettrone dovrebbe trovare il suo partner nel cristallo di germanio puro si comporta effettivamente come un posto vuoto: se si applica una tensione al cristallo «drogato» con il boro, l'elettrone più vicino, attratto dall'elettrodo positivo, andrà a finire nella lacuna, lasciando a sua volta una lacuna nel luogo in cui si trovava; l'elettrone contiguo, più distante dall'elettrodo positivo, si sposterà nella nuova lacuna. Così, in pratica, sarà la lacuna a spostarsi, dirigendosi verso l'elettrodo negativo, cioè muovendosi esattamente come un elettrone, ma in direzione opposta. In breve, il cristallo è diventato un conduttore di corrente elettrica.

Per funzionare a dovere, il cristallo deve essere quasi perfettamente puro, con l'aggiunta di una ben definita quantità della impurità in questione (arsenico o boro). Il semiconduttore germanio-arsenico, con il suo elettrone vagante, viene chiamato di "tipo n" (negativo), mentre quello germanio-boro, in cui a vagare è una lacuna che si comporta come se fosse carica positivamente, è detto di "tipo p" (positivo).

A differenza di quanto avviene nei conduttori normali, la resistenza elettrica dei semiconduttori cala al crescere della temperatura, perché le temperature superiori indeboliscono la presa degli atomi sugli elettroni, consentendo a questi ultimi di muoversi più liberamente. (Nei conduttori metallici gli elettroni sono già abbastanza liberi alle temperature ordinarie, così che, accrescendo le temperature, si aumenta il moto casuale, che ostacola il flusso degli elettroni in risposta al campo elettrico.) Determinando la resistenza di un semiconduttore si possono misurare temperature troppo alte per venire convenientemente misurate in altro modo: semiconduttori di questo genere vengono pertanto chiamati "termistori".

Ma i semiconduttori in combinazione tra loro possono fare ben altro: supponiamo di fabbricare un cristallo di germanio per metà di tipo "p" e per metà di tipo "n". Se colleghiamo la parte di tipo "n" a un elettrodo negativo e quella di tipo "p" a uno positivo, gli elettroni della parte di tipo "n" si sposteranno attraverso il cristallo verso l'elettrodo positivo, mentre le lacune della parte di tipo "p" migreranno in direzione opposta, verso l'elettrodo negativo, generando quindi una corrente nel cristallo. Invertendo la situazione - collegando, cioè, la parte "n" del semiconduttore con l'elettrodo positivo e viceversa - si otterrà di far viaggiare gli elettroni della parte di tipo "n" verso l'elettrodo positivo - allontanandosi, cioè, dalla parte di tipo "p" - mentre le lacune della parte "p" si sposteranno allontanandosi dalla parte "n"; il risultato sarà che le zone prossime alla giunzione tra parte "n" e parte "p" perderanno elettroni liberi e lacune, interrompendo il circuito: non passerà quindi corrente.

In breve, abbiamo creato un sistema che può fungere da raddrizzatore: se applichiamo una corrente alternata a questo cristallo «doppio», esso la lascerà passare in una direzione e non nell'altra, convertendo la corrente alternata in corrente continua; il cristallo funzionerà come un diodo, proprio analogamente a una valvola elettronica.

In un certo senso l'elettronica ha compiuto un giro completo: il tubo elettronico aveva sostituito il cristallo, e ora il cristallo tornava a sostituire la valvola elettronica; si trattava però di un cristallo di tipo nuovo, assai più sensibile e affidabile di quelli introdotti da Braun circa mezzo secolo prima.

Il nuovo cristallo offriva vantaggi enormi rispetto al tubo elettronico: non richiedeva il vuoto, quindi poteva essere piccolo; non si rompeva; non «perdeva»; poiché funzionava a temperatura ambiente, richiedeva poca corrente e non aveva bisogno di tempo per riscaldarsi. Insomma, aveva solo vantaggi e nessuno svantaggio, alla sola condizione di riuscire a produrlo in modo abbastanza economico e con sufficiente precisione.

I nuovi cristalli, che erano solidi in ogni loro parte, aprirono la via a quella che venne chiamata l'"elettronica dello stato solido". Il nuovo componente fu chiamato "transistor" (su proposta di John Robinson Pierce dei Bell Lab), perché trasferisce (in inglese, "transfers") un segnale attraverso un "resistore".

Nel 1948, William Bradford Shockley, Walter Houser Brattain e John Bardeen dei Bell Lab produssero un transistor che poteva fungere da amplificatore; si trattava di un cristallo di germanio con un sottile strato di tipo "p" posto a sandwich tra due strati di tipo "n". Era cioè un triodo, con l'equivalente di una griglia tra filamento e placca. Regolando la carica positiva dello strato "p" intermedio, si poteva fare in modo che le lacune migrassero attraverso le giunzioni regolando il flusso di elettroni; inoltre, con una piccola variazione della corrente nello strato "p" intermedio, si poteva ottenere una grande variazione della corrente che attraversa l'intera struttura.

Ciò consentiva di usare il triodo a semiconduttore come amplificatore, proprio come un triodo a valvola elettronica. Shockley e i suoi collaboratori Brattain e Bardeen ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1956.

Per quanto, in teoria, i transistor facessero un lavoro eccellente, la loro utilizzazione pratica richiese alcuni progressi tecnologici concomitanti - come del resto accade sempre nella scienza applicata.

Il rendimento dei transistor dipendeva in modo decisivo dall'uso di materiali di purezza estrema, che permettessero di controllare attentamente la natura e la concentrazione delle impurità aggiunte deliberatamente.

Fortunatamente, William Gardner Pfann nel 1952 introdusse la tecnica della "raffinazione a zone". Una barra, per esempio di germanio, viene posta nella cavità di un elemento circolare riscaldante, che ammorbidisce e comincia a far fondere una sezione della barra; questa viene spinta attraverso la cavità, così che la zona fusa si sposta al suo interno; le impurità della barra tendono a restare nella zona fusa e sono perciò letteralmente «lavate» verso le estremità della barra; dopo

qualche passaggio di questo genere, il corpo centrale del cristallo di germanio acquista una purezza senza precedenti.

Verso il 1953 minuscoli transistor cominciarono a essere utilizzati negli apparecchi acustici, che potevano così essere costruiti tanto piccoli da stare all'interno dell'orecchio. In poco tempo i transistor vennero sviluppati in modo che potessero operare con frequenze più elevate, reggere a temperature superiori e venir fabbricati ancora più piccoli. Anzi, essi finirono per essere tanto piccoli che non furono più usati singolarmente: piccoli chip (schegge) di silicio vennero incisi in modo da formare dei "circuiti integrati", capaci di fare quello per cui prima era necessario un gran numero di valvole. Negli anni settanta erano ormai talmente piccoli da meritarsi di esser chiamati "microchips".

Questi minuscoli microcircuiti a stato solido sono oggi usati universalmente e costituiscono forse la più sbalorditiva tra tutte le rivoluzioni scientifiche avvenute nella storia dell'umanità. Essi hanno consentito di fabbricare le radioline, di inserire nel volume ridotto dei satelliti e delle sonde spaziali un enorme numero di funzioni; ma la cosa più importante è che hanno reso possibile lo sviluppo di computer sempre più piccoli, sempre più economici e sempre più versatili, e poi, negli anni ottanta, anche di robot.

MASER E LASER.

I MASER.

Un altro recente progresso di straordinaria importanza ha inizio con le ricerche sulla molecola di ammoniaca (NH_3). I tre atomi di idrogeno di tale molecola possono esser pensati come situati ai tre vertici di un triangolo equilatero, mentre l'unico atomo di azoto se ne sta a una certa distanza dal piano del triangolo, al di sopra del suo centro.

La molecola di ammoniaca può vibrare, cioè l'atomo di azoto può spostarsi, attraversando il piano del triangolo, fino a occupare la posizione simmetrica dall'altra parte, per poi ritornare alla posizione originaria, e così via. È possibile mettere in vibrazione la molecola di ammoniaca, che ha una frequenza naturale di 24 miliardi di cicli al secondo.

Questo periodo di vibrazione è estremamente costante, assai più di quello di qualsiasi dispositivo artificiale che vibri - perfino più regolare del moto dei corpi celesti. Si può fare in modo che queste molecole in vibrazione controllino delle correnti elettriche, che a loro volta controlleranno dei congegni per misurare il tempo con una precisione senza precedenti - come fu dimostrato per la prima volta nel 1949 dal fisico americano Harold Lyons. Alla metà degli anni cinquanta questi "orologi atomici" superavano ormai tutti i normali cronometri. Mediante gli atomi di idrogeno si è potuto ottenere una misurazione del tempo con l'approssimazione di 1 secondo su 1700000 anni.

La molecola di ammoniaca, vibrando, emette un fascio di radiazione elettromagnetica con la frequenza di 24 miliardi di cicli al secondo.

Questa radiazione ha una lunghezza d'onda di 1,25 centimetri e si trova nella regione spettrale delle microonde. Un altro modo di considerare questo fatto è immaginare che la molecola di ammoniaca possa occupare l'uno o l'altro di due livelli energetici, con una differenza di energia pari a quella di un fotone corrispondente alla radiazione di 1,25 centimetri. Se la molecola di ammoniaca scende dal livello di energia superiore a quello di energia inferiore, emette un fotone come quello descritto. Se una molecola nel livello di energia inferiore assorbe un fotone con queste caratteristiche, sale nel livello superiore.

Cosa accade, però, se una molecola di ammoniaca si trova già nel livello energetico superiore e viene esposta a questi fotoni? Già nel 1917 Einstein aveva fatto osservare che, se un

fotone di caratteristiche appropriate avesse colpito una molecola nel livello energetico superiore, quest'ultima avrebbe dovuto scendere al livello inferiore, emettendo un fotone con le stesse caratteristiche e la stessa direzione del fotone incidente. Ci sarebbero quindi stati due fotoni identici, là dove prima ve ne era uno solo. La teoria fu confermata sperimentalmente nel 1924.

L'ammoniaca esposta a radiazioni di microonde subirà quindi uno tra i due cambiamenti possibili: le molecole possono venir «pompate» dal livello inferiore a quello superiore, oppure riportate da quello superiore a quello inferiore. In condizioni normali prevarrà il primo dei due processi, perché solo una piccolissima percentuale delle molecole di ammoniaca si troverebbero, in un dato istante, nel livello energetico superiore.

Supponiamo, però, che si trovi un metodo per portare tutte, o quasi tutte, le molecole nel livello energetico superiore. Allora prevarrebbe il passaggio dal livello superiore a quello inferiore, e accadrebbe una cosa abbastanza interessante: nel fascio incidente di microonde un fotone farebbe abbassare una molecola di livello; verrebbe emesso un secondo fotone, ed entrambi proseguirebbero colpendo due molecole, così che verrebbero liberati altri due fotoni.

Tutti e quattro determinerebbero l'emissione di altri quattro fotoni, e così via. Il fotone iniziale avrebbe così provocato una valanga di fotoni, tutti aventi esattamente la stessa energia e la stessa direzione.

Nel 1953, il fisico americano Charles Hard Townes ideò un metodo per isolare le molecole di ammoniaca situate nel livello energetico superiore e le sottopose alla stimolazione da parte di fotoni appartenenti alla regione delle microonde e aventi l'energia appropriata. I fotoni incidenti erano pochissimi, quelli in uscita erano una valanga: la radiazione in entrata era stata quindi grandemente amplificata.

A questo processo venne dato il nome di «amplificazione di microonde mediante emissione stimolata di radiazione» (in inglese Microwave Amplification by stimulated Emission of Radiation), abbreviato in "maser", nome con il quale viene indicata anche l'apparecchiatura con cui si ottiene il processo.

Vennero ben presto messi a punto dei maser a stato solido, cioè solidi in cui si poteva far assumere agli elettroni l'uno o l'altro di due livelli energetici. I primi maser, sia a gas che a stato solido, erano intermittenti, cioè prima si dovevano «pompare» al livello energetico superiore, per poi stimolarli. Dopo una rapida emissione di radiazione, non si poteva più ottenere nulla finché non si ripeteva il processo di pompaggio.

Per superare questo inconveniente, al fisico olandese-americano Nicolaas Bloembergen venne l'idea di far uso di un sistema a tre livelli: se nel materiale prescelto per il nucleo del maser gli elettroni potevano occupare uno qualsiasi dei tre livelli - uno inferiore, uno mediano e uno superiore - pompaggio ed emissione potevano procedere simultaneamente. Gli elettroni vengono pompati dal livello energetico inferiore a quello superiore, raggiunto il quale ricadono verso i livelli inferiori in seguito a una stimolazione appropriata - prima ricadono nel livello mediano, poi in quello più basso. Fotoni di energia diversa sono necessari rispettivamente per il pompaggio e per l'emissione stimolata, così che i due processi non interferiscono tra loro. Abbiamo in tal modo ottenuto un maser continuo.

In quanto amplificatori di microonde, i maser possono essere usati come rivelatori molto sensibili in radioastronomia, dove fasci di microonde estremamente deboli provenienti dallo spazio esterno vengono fortemente intensificati mantenendo un'ottima fedeltà alle caratteristiche della radiazione originale. (Riproduzione senza perdita delle caratteristiche originali equivale a riproduzione «con basso rumore»: in questo senso i maser si possono considerare straordinariamente «silenziosi».) I maser hanno dimostrato la loro utilità anche nello spazio esterno: a bordo del satellite sovietico "Cosmos 97", lanciato il 30 novembre 1965, si trovava un maser, che fornì un'ottima prestazione.

Per le sue ricerche Townes ricevette il premio Nobel per la fisica del 1964, premio che condivise con due fisici sovietici, Nicolaj Gennedjevic' Basov e Aleksandr Mikhailovic' Prochorov, che avevano lavorato indipendentemente alla teoria dei maser.

I LASER.

In linea di principio la tecnica dei maser può essere applicata alle onde elettromagnetiche di qualsiasi lunghezza d'onda, e in particolare a quelle della luce visibile. Townes mise in evidenza la possibilità concreta di tale applicazione nel 1958; un maser che produca onde luminose si può chiamare "maser ottico", e il relativo processo «amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazione», da cui la ben nota abbreviazione "laser".

Il primo laser funzionante fu costruito nel 1960 dal fisico americano Theodore Harold Maiman, che usò, per questo scopo, una barra di rubino sintetico, che è essenzialmente ossido di alluminio con l'aggiunta di un po' di ossido di cromo. Se si espone tale barretta alla luce, gli elettroni degli atomi di cromo vengono «pompati» ai livelli energetici superiori e, dopo poco tempo, cominciano a ridiscendere. I primi pochi fotoni di luce emessi (con una lunghezza d'onda di 6943 A) stimolano l'emissione di altri fotoni simili, e la barra emette improvvisamente un fascio di luce rosso scuro avente un'intensità quadrupla di quella della luce alla superficie solare. Prima della fine del 1960 laser in continua erano stati costruiti da un fisico iraniano, Ali Javan, che lavorava ai Bell Laboratories; egli aveva fatto uso di una miscela di gas (neon ed elio) come sorgente luminosa.

Il laser rese possibile una forma completamente nuova di luce. La luce era la più intensa che fosse mai stata prodotta, e anche quella più rigorosamente monocromatica (cioè costituita da una sola lunghezza d'onda); ma era ancora di più.

La luce normale, prodotta in qualsiasi altro modo - da un fuoco di legna, dal sole o da una lucciola - consiste di «pacchetti» di onde relativamente brevi, che si possono descrivere come spezzoni di onda orientati in tutte le direzioni. La luce normale è fatta di innumerevoli spezzoni di questo genere.

La luce prodotta da un laser, invece, è formata di fotoni identici, che si muovono nella stessa direzione; pertanto, i pacchetti d'onda hanno tutti la stessa frequenza; e poiché sono allineati - per così dire - esattamente uno dopo l'altro, si fondono. La luce appare costituita da lunghi segmenti di onda di ampiezza (altezza) e frequenza costanti, cioè di luce che viene detta "coerente", perché i pacchetti appaiono «attaccati» l'uno all'altro. I fisici sapevano produrre radiazione coerente a lunghezze d'onda maggiori, ma fino al 1960 ciò non era mai stato fatto per la luce.

Inoltre il laser era stato studiato in modo da accentuare la tendenza naturale dei fotoni a muoversi nella stessa direzione. Le due estremità del rubino erano lavorate con molta cura e argentate, in modo che diventassero simili a specchi piani. I fotoni emessi sfrecciavano avanti e indietro lungo la barra, causando l'emissione di altri fotoni a ogni passaggio, fin quando avevano accumulato un'intensità sufficiente ad attraversare l'estremità argentata più sottilmente. Riuscivano a emergere quei fotoni che erano stati emessi in una direzione esattamente parallela all'asse maggiore della barra, perché erano quelli che continuavano a muoversi avanti e indietro, colpendo e ricolpendo le estremità argentate. Se per caso fotoni aventi energia appropriata ma direzione diversa (anche di pochissimo) fossero entrati nella barra dando l'avvio a un treno di fotoni stimolati in tale diversa direzione, questi avrebbero ben presto attraversato le pareti della barra, al massimo dopo qualche riflessione.

Un fascio di luce laser è costituito da onde coerenti così parallele da poter viaggiare per lunghi percorsi senza divergere in modo indesiderato. Lo si può focalizzare con grandissima precisione, tanto da riuscire a scaldare una caffettiera a distanza di migliaia di chilometri. I fasci laser hanno raggiunto perfino la luna, nel 1962, allargandosi su un diametro di soli tre chilometri, dopo aver percorso quasi 400 mila chilometri!

Una volta inventato il laser, l'interesse per i suoi ulteriori sviluppi divenne travolgente; nel giro di qualche anno erano stati costruiti laser capaci di produrre luce coerente in centinaia di diverse lunghezze d'onda, dall'ultravioletto vicino all'infrarosso lontano. A tale scopo sono state usate le più svariate sostanze solide, ossidi metallici, fluoruri, tungstati, semiconduttori, liquidi e colonne di gas. Ogni varietà ha i suoi vantaggi e i suoi svantaggi.

Nel 1964 il primo "laser chimico" fu realizzato dal fisico americano Jerome V. V. Kasper. In questo laser la sorgente di energia è una reazione chimica (nel primo costruito, si trattava della dissociazione di CF_3I da parte di un impulso luminoso). Il vantaggio del laser chimico rispetto al tipo comune di laser sta nel fatto che la reazione chimica che produce energia può essere incorporata nello stesso laser, e non occorre una fonte di energia esterna. La differenza è simile a quella tra un apparecchio alimentato a pile e uno collegato a una presa. C'è un ovvio guadagno di trasportabilità, per non parlare del fatto che sembra che i laser chimici abbiano un rendimento considerevolmente più elevato di quelli ordinari (12 per cento e più, in confronto al 2 per cento o meno).

I "laser organici" - quelli in cui un colorante organico complesso viene usato come sorgente di luce coerente - sono stati sviluppati nel 1966 da John R. Lankard e Peter Sorokin. La complessità della molecola rende possibile produrre luce mediante una varietà di transizioni elettroniche e pertanto in una varietà di lunghezze d'onda. Un laser organico può essere "sintonizzato" in modo che emetta una qualsiasi lunghezza d'onda entro un determinato intervallo, mentre gli altri tipi di laser sono limitati a un'unica lunghezza d'onda.

La sottigliezza del fascio di luce laser significa che si può concentrare molta energia in una zona piccolissima, nella quale la temperatura raggiunge livelli altissimi. Il laser può vaporizzare metalli consentendo una rapida analisi spettroscopica, e all'occorrenza può saldare, tagliare, praticare fori di qualsiasi forma voluta in sostanze con un alto punto di fusione. Inviando fasci di luce laser nell'occhio, i chirurghi sono riusciti a saldare retine distaccate così rapidamente che i tessuti vicini non hanno avuto il tempo di risentirne negativamente. Analogamente i laser sono stati usati per distruggere i tumori.

Per mostrare la vasta gamma delle applicazioni del laser, Arthur L. Shawlow ha ideato il banale (ma di grande effetto) "cancellatore-laser", in cui un lampo brevissimo fa evaporare l'inchiostro dei caratteri dattilografati senza intaccare minimamente la carta sottostante; all'altro estremo, gli "interferometri a laser" possono effettuare misurazioni di precisione senza precedenti. Laser posti a distanza possono rivelare l'intensificazione delle deformazioni della crosta terrestre: spostamenti delle frange d'interferenza della loro luce mettono infatti in evidenza i minimi movimenti nella terra con la precisione di una parte su un trilione. I primi uomini giunti sulla luna, inoltre, vi hanno lasciato un sistema riflettente destinato a rinviare fasci laser sulla terra; con questo metodo si può determinare la distanza della luna con precisione superiore a quella generalmente ottenibile nella misurazione delle distanze da un punto all'altro della superficie terrestre.

Un'applicazione possibile che ha suscitato grande interesse fin dall'inizio è stato l'utilizzo di raggi laser come onde portanti nelle comunicazioni. L'alta frequenza della luce coerente, rispetto a quella delle onde radio coerenti usate oggi nella radio e nella televisione, fa sperare nella possibilità di addensare migliaia di canali nello spazio oggi occupato da uno solo. Si apre così la prospettiva che ogni uomo o donna sulla terra possa avere una propria lunghezza d'onda personale. Naturalmente la luce laser va modulata. Variazioni nelle correnti elettriche prodotte dal suono vanno tradotte in variazioni della luce laser (mediante cambiamenti di ampiezza o di frequenza, o forse semplicemente accendendola e spegnendola); tali modulazioni possono a loro volta essere usate per produrre altrove variazioni in una corrente elettrica. Sistemi del genere sono allo studio.

Potrebbe darsi che, siccome la luce è più soggetta delle onde radio all'interferenza di nuvole, nebbia e polvere, si debba trasmettere la luce laser lungo tubature contenenti lenti (per riconcentrare di quando in quando il fascio) e specchi (per permetterle di aggirare gli angoli). Comunque, è stato costruito un "laser all'anidride carbonica" che produce fasci laser continui, di potenza senza

precedenti, che si trovano nell'infrarosso, a lunghezza d'onda tali da risentire ben poco delle condizioni atmosferiche. Ciò potrebbe rendere possibile anche la comunicazione via atmosfera.

Di fattibilità assai più immediata è l'uso di fasci laser modulati all'interno di "fibre ottiche", filamenti di vetro supertrasparente più sottili di un capello umano, che possono sostituire i fili di rame nelle comunicazioni telefoniche. Il vetro costa assai meno del rame ed è disponibile in quantità assai maggiori, e può portare molta più informazione sotto forma di luce laser. Già gli ingombranti cavi di rame stanno lasciando, da più parti, il posto ai meno ingombranti fasci di fibre ottiche.

Un'applicazione ancora più affascinante del laser, che è già alle porte, riguarda un nuovo tipo di fotografia. Nella fotografia comune un fascio di luce ordinaria riflessa da un oggetto incide su una pellicola fotografica; ciò che viene registrato è la sezione trasversale della luce, che non rappresenta assolutamente tutta l'informazione che potenzialmente è contenuta in essa.

Supponiamo che invece un fascio di luce sia diviso in due. Una parte colpisce un oggetto e viene riflessa con tutte le irregolarità che questo oggetto le imprime. La seconda parte viene riflessa da uno specchio senza irregolarità: le due parti si incontrano sulla pellicola fotografica e l'interferenza delle varie lunghezze d'onda viene registrata. In teoria la registrazione di questa figura di interferenza include tutti i dati relativi a ciascun fascio di luce.

La fotografia che registra questa figura d'interferenza, quando viene sviluppata, sembra vuota, ma se vi si invia sopra della luce che la attraversa rilevando tutte le caratteristiche dell'interferenza, questa luce produce un'immagine che contiene l'informazione completa; l'immagine è tridimensionale così come lo era la superficie da cui è stata riflessa la luce, e si possono fare ordinarie fotografie dell'immagine da vari angoli che mostrano il cambiamento di prospettiva.

Quest'idea fu elaborata per la prima volta dal fisico inglese di origine ungherese Dennis Gabor nel 1947, mentre cercava un metodo che rendesse più nitide le immagini prodotte dal microscopio elettronico.

Egli chiamò questo metodo "olografia" (da una voce latina che significa «scrittura integrale»).

L'idea di Gabor era ben fondata teoricamente, ma non poteva essere realizzata, perché la luce ordinaria non era adatta. A causa delle diverse lunghezze d'onda che si muovevano in tutte le direzioni, le frange d'interferenza prodotte dai due fasci di luce sarebbero state così caotiche da non fornire alcuna informazione. Sarebbe stato come produrre un milione di immagini confuse tutte sovrapposte in posizioni leggermente diverse.

L'introduzione della luce laser cambiò del tutto la situazione. Nel 1965, Emmet N. Leith e Juris Upatnieks dell'Università del Michigan riuscirono a produrre i primi ologrammi; da allora la tecnica è stata affinata al punto di rendere possibile l'olografia a colori: ora le frange d'interferenza fotografate si possono osservare assai bene anche in luce ordinaria. La "microolografia" promette di aggiungere (letteralmente) una nuova dimensione alle ricerche in biologia, e nessuno può dire dove questo ci porterà.

Capitolo 10.
IL REATTORE.

L'ENERGIA.

I rapidi progressi della tecnologia del ventesimo secolo sono avvenuti al prezzo di un aumento enorme dei consumi delle risorse energetiche terrestri. Man mano che le nazioni sottosviluppate, con i loro miliardi di abitanti, raggiungeranno l'elevato livello di vita dei paesi

industrializzati, il consumo di combustibile crescerà in misura spettacolare. Dove potremo trovare le risorse di energia necessarie per sostentare la nostra civiltà?

Abbiamo già visto scomparire buona parte del legname della terra: la legna è stato il nostro primo combustibile. Già all'inizio dell'era cristiana, molte zone della Grecia, dell'Africa settentrionale e del Vicino Oriente erano state diboscate senza pietà, in parte per procurarsi combustibile, in parte per sgomberare la terra e usarla per il pascolo e l'agricoltura. Il taglio incontrollato delle foreste ha costituito un duplice disastro: non solo ha distrutto le riserve di legno, ma anche ha reso improduttivo - in modo più o meno permanente - il terreno, messo allo scoperto in modo così drastico. La maggior parte di queste antiche regioni, che una volta sostentavano fiorenti civiltà, sono oggi sterili e improduttive, e la gente che vi abita vive oppressa dalla povertà.

Il Medioevo ha visto il graduale diboscamento dell'Europa occidentale, e i tempi moderni hanno assistito a un diboscamento assai più rapido del continente nordamericano. Si può affermare che nelle zone temperate del mondo, salvo il Canada e la Siberia, non restino più grandi aree di foresta vergine.

CARBONE E PETROLIO: COMBUSTIBILI FOSSILI.

Il carbone e il petrolio hanno preso da molto tempo il posto del legno come combustibili. Già nel 200 avanti Cristo il botanico greco Teofrasto citava il carbone, ma le prime notizie di estrazione effettiva del carbone in Europa non risalgono a prima del dodicesimo secolo. Nel diciassettesimo secolo l'Inghilterra, ormai disperatamente a corto del legname necessario per la sua flotta, cominciò a passare all'uso su larga scala del carbone come combustibile, ispirata forse dal fatto che gli olandesi avevano già cominciato a scavare in cerca di carbone. (Non furono, comunque, i primi: Marco Polo, nel famoso resoconto dei viaggi in Cina da lui fatti alla fine del '200, aveva narrato come in quelle terre, allora le più avanzate del mondo dal punto di vista tecnologico, bruciassero il carbone.)

Nel 1660 l'Inghilterra produceva 2 milioni di tonnellate di carbone all'anno, cioè più dell'80 per cento di tutto il carbone che veniva prodotto nel mondo.

In un primo tempo esso venne usato soprattutto come combustibile domestico; ma, nel 1603 un inglese, Hugh Platt, scoprì che, se si riscaldava il carbone evitando il contatto con l'ossigeno, la sostanza catramosa presente si separava e bruciava, lasciando solo carbonio puro; questo residuo venne chiamato "coke".

Sulle prime il coke non era di buona qualità, ma con il tempo venne migliorato e alla fine fu possibile usarlo al posto del carbone di legna per fondere i minerali di ferro. Il coke bruciava ad alta temperatura: i suoi atomi di carbonio si combinavano con quelli di ossigeno del minerale di ferro, lasciando come residuo ferro metallico. Nel 1709 un altro inglese, Abraham Darby, introdusse l'uso del coke su grande scala per la produzione del ferro. Quando arrivò la macchina a vapore, si usò il carbone per riscaldare l'acqua e farla bollire, il che contribuì all'avvento della Rivoluzione industriale.

Altrove il cambiamento avvenne più lentamente. Ancora nel 1800 il legno copriva il 94 per cento del fabbisogno di combustibile negli Stati Uniti, giovane stato ricco di foreste. Nel 1885, comunque, il legno copriva soltanto il 50 per cento del fabbisogno; nel 1980, meno del 3 per cento. Nel frattempo era diminuita l'importanza relativa del carbone ed era aumentato l'uso del petrolio e del gas naturale. Negli Stati Uniti, nel 1900, l'energia fornita dal carbone era dieci volte quella fornita dal petrolio e dal gas naturale messi insieme. Mezzo secolo dopo il carbone forniva soltanto un terzo dell'energia rispetto a petrolio e gas.

Nell'antichità l'olio usato nelle lampade per l'illuminazione era derivato da fonti vegetali e animali. Tuttavia, durante le lunghissime ere geologiche era spesso accaduto che piccoli animali ricchi di olio, che vivevano nelle acque marine non troppo profonde, sfuggissero, dopo la morte, alla sorte di venir mangiati; immersi nella fanghiglia, erano rimasti sepolti negli strati sedimentari.

Dopo aver subìto una lenta trasformazione chimica, l'olio si è convertito in una complessa miscela di idrocarburi, che oggi viene appropriatamente chiamata petrolio (che significa «olio derivato dalla pietra»). Tale è stata l'importanza del petrolio per l'umanità durante le ultime due generazioni che, in inglese, si indica il petrolio con il termine "oil" (olio), senza tema di creare confusioni con l'olio di oliva o di cocco.

Qualche volta il petrolio si trovava alla superficie della terra, particolarmente nel Medio Oriente, che ne è ricco. Era la "pece" con cui Noè, seguendo le istruzioni ricevute, dovette spalmare l'interno e l'esterno dell'Arca per renderla impermeabile. Analogamente, anche il canestro di giunchi galleggiante in cui fu deposto Mosè appena nato era stato spalmato di pece perché non affondasse. Frazioni più leggere del petrolio ("nafta") venivano talvolta raccolte e utilizzate nelle lampade o nei bracieri usati nelle cerimonie religiose.

Dopo il 1850 aumentò la domanda di liquidi infiammabili per le lucerne: c'era l'olio di balena e anche l'olio ricavato dal carbone (ottenuto riscaldando il carbone in assenza di aria). Un'altra fonte erano gli scisti bituminosi, un materiale molle, simile alla cera, che riscaldato secerne un liquido, il "cherosene"; tale materiale fu trovato nella Pennsylvania occidentale; nel 1859 un ferroviere americano, Edwin Laurentine Drake, tentò una strada nuova.

Drake sapeva che si scavavano pozzi per estrarne l'acqua e sapeva che talora si scavava più in profondità per attingere dell'acqua salmastra da cui si ricavava il sale. Talora insieme a essa sgorgava una sostanza oleosa molto infiammabile. Si diceva che in Cina e in Birmania, duemila anni prima, questa sostanza oleosa venisse bruciata per far evaporare l'acqua salmastra e ottenere il sale.

Perché, allora, non scavare in cerca di questo olio? A quei tempi il petrolio non veniva usato solo per le lampade, ma anche nella preparazione di medicine; e Drake pensava che se fosse riuscito a estrarlo avrebbe potuto venderlo bene. Scavò un pozzo profondo una ventina di metri a Titusville, nella Pennsylvania occidentale e, il 28 agosto 1859, trovò il petrolio: aveva trivellato il primo "pozzo petrolifero".

Per il primo mezzo secolo gli usi del petrolio furono limitati; ma, con l'avvento del motore a combustione interna, la domanda di petrolio crebbe a dismisura. Una frazione del liquido che fosse più leggera del cherosene (cioè più volatile) era proprio quel che ci voleva per il nuovo tipo di motore. Questa frazione era la "benzina"; la grande caccia al petrolio era cominciata, e da un secolo a questa parte non è mai cessata.

I giacimenti petroliferi della Pennsylvania si esaurirono ben presto, ma all'inizio del ventesimo secolo se ne scoprirono di molto più grandi nel Texas, poi, negli anni quaranta e cinquanta, di più grandi ancora nel Medio Oriente.

Il petrolio offre molti vantaggi rispetto al carbone. Non è necessario far scendere degli esseri umani nel sottosuolo per strapparlo alla terra; né occorre caricarne innumerevoli mezzi di trasporto; né si deve immagazzinare il combustibile nelle cantine o introdurlo a palate nelle fornaci; e non si ha il problema delle ceneri da smaltire. Il petrolio viene estratto dalla terra pompandolo, viene distribuito in condotte (o viaggia in navi cisterna), è immagazzinato in serbatoi sotterranei e introdotto automaticamente nei bruciatori, che si possono accendere e spegnere a piacere, senza produrre ceneri.

Soprattutto dopo la seconda guerra mondiale il mondo intero è passato dall'uso del carbone a quello del petrolio. Il carbone è rimasto una materia prima vitale per la produzione di ferro e acciaio e per vari altri scopi, ma il petrolio è diventato la principale risorsa del mondo come combustibile.

Alcune frazioni del petrolio sono così volatili che a temperatura ordinaria sono sotto forma di vapore; si tratta del "gas naturale", più spesso indicato semplicemente con il termine "gas". Esso è ancora più conveniente del petrolio, e il suo consumo è aumentato anche più rapidamente di quello delle frazioni liquide del petrolio.

Queste risorse, però, sono pur sempre limitate. Il gas, il petrolio e il carbone sono "combustibili fossili", residui di vita vegetale e animale di lontane ere geologiche, e non possono

essere sostituiti una volta esauriti. Per quanto riguarda i combustibili fossili, l'umanità sta consumando il proprio capitale a un tasso davvero insostenibile. In particolare il petrolio sta esaurendosi rapidamente. Oggi il mondo brucia più di 4 milioni di barili di petrolio ogni ora; e nonostante tutti gli sforzi di limitarlo, il tasso dei consumi continuerà a crescere nel futuro prossimo. Anche se rimane sulla terra quasi un trilione di barili, al livello attuale dei consumi essi non possono bastare per più di una trentina di anni.

Certo, è possibile ottenere altro petrolio combinando il carbone, che è più abbondante, con idrogeno, sotto pressione. Il primo a sviluppare questo processo fu, negli anni venti, il chimico tedesco Friedrich Bergius, che per il suo lavoro ebbe, insieme ad altri, il premio Nobel per la chimica nel 1931. La riserva di carbone è veramente ingente, forse attorno ai 7 trilioni di tonnellate, ma non tutto è di facile estrazione. Verso il venticinquesimo secolo, se non prima, il carbone potrebbe diventare un bene troppo costoso.

Possiamo anche pensare di trovare nuovi giacimenti. Forse, per quanto riguarda carbone e petrolio, ci aspettano delle sorprese in Australia, nel Sahara, perfino nell'Antartide. Inoltre qualche progresso tecnologico potrebbe rendere economico lo sfruttamento di filoni di carbone più profondi e più sottili o la ricerca del petrolio a maggiori profondità e la sua estrazione dagli scisti bituminosi e dai giacimenti sottomarini.

Senza dubbio troveremo anche il modo di elevare il rendimento del combustibile di cui disponiamo. Nel corso del processo in cui si brucia combustibile per produrre calore, per convertire acqua in vapore e far funzionare un generatore di elettricità molta energia va sprecata. Gran parte di queste perdite potrebbe essere evitata se si riuscisse a convertire direttamente il calore in elettricità. Tale possibilità era già stata intravista nel 1823, quando un fisico tedesco, Thomas Johann Seebeck, osservò che, formando un circuito chiuso con due metalli diversi e riscaldando la giunzione dei due elementi, si poteva far deviare l'ago di una bussola posta nelle vicinanze: ciò indicava che il calore faceva circolare una corrente elettrica nel circuito ("termoelettricità"). Seebeck, tuttavia, interpretò in modo sbagliato la propria scoperta, la quale sul momento non ebbe alcun seguito.

Con l'avvento delle tecnologie basate sui semiconduttori, il vecchio "effetto Seebeck" tornò alla ribalta. I congegni termoelettrici fanno normalmente uso dei semiconduttori: riscaldando un estremo di un semiconduttore, si crea un potenziale elettrico nel materiale: in un semiconduttore di tipo p l'estremo freddo diventa negativo e, in uno di tipo n, diventa positivo; se si congiungono questi due tipi di semiconduttore in una struttura a U, con la giunzione n-p sul fondo della U, e si riscalda tale parte, l'estremo superiore del ramo p acquista una carica negativa e l'estremo superiore del ramo n una carica positiva; di conseguenza, la corrente scorrerà fra un estremo e l'altro, mantenendosi fintantoché sussiste la differenza di temperatura. (Inversamente, si può usare una corrente per produrre un abbassamento di temperatura, il che consente di usare un apparecchio termoelettrico anche nella refrigerazione.)

La pila termoelettrica, non richiedendo un dispendioso generatore o un'ingombrante macchina a vapore, è portatile e può essere installata in zone isolate come sorgente di elettricità su piccola scala. Tutto ciò che le occorre come fonte di energia è del cherosene per il riscaldamento. Sembra che apparecchi di questo genere siano usati comunemente nelle zone rurali dell'Unione Sovietica.

Nonostante tutti i possibili aumenti di rendimento del combustibile usato oggi, e malgrado la possibilità che si trovino nuovi giacimenti di petrolio o di carbone, si tratta sempre di fonti di energia decisamente limitate. Verrà il giorno, non molto lontano nel futuro, in cui né il carbone né il petrolio potranno più essere la principale fonte energetica su larga scala.

Si dovrà ridurre l'impiego dei combustibili fossili, e ciò probabilmente assai prima che queste riserve siano effettivamente esaurite: sussistono infatti dei pericoli nel loro crescente impiego.

Il carbone non è carbonio puro, il petrolio non è un idrocarburo puro; entrambi contengono piccole quantità di azoto e di composti dello zolfo. Bruciando combustibili fossili (specie il

carbone), si immettono nell'aria ossidi di azoto e di zolfo. Anche se una tonnellata di carbone ne immette una piccola quantità, quando si fa il conto del totale, si arriva ai circa 90 milioni di tonnellate di ossidi di zolfo che sono stati annualmente scaricati nell'atmosfera nel corso degli anni settanta.

Queste impurità sono una delle fonti principali di inquinamento e (se le condizioni atmosferiche ne favoriscono la formazione) dello "smog" che avvolge le città, provocando seri danni ai polmoni e in certi casi addirittura la morte di chi già soffre di gravi disturbi respiratori.

L'aria viene ripulita dall'inquinamento per l'intervento della pioggia, il che però non fa che creare problemi nuovi, forse maggiori.

Gli ossidi di azoto e di zolfo, sciogliendosi nell'acqua, la rendono leggermente acida, così che quella che raggiunge il terreno è "pioggia acida".

La pioggia non è abbastanza acida da farci direttamente del male, ma rende acidi gli stagni e i laghi in cui cade - non tanto, ma a sufficienza per causare la morte di buona parte dei pesci e delle altre forme di vita acquatica, specialmente quando i laghi non hanno letti di calce che potrebbero neutralizzare in parte l'acidità. La pioggia acida danneggia anche gli alberi; tale danno è più grave là dove la combustione di carbone è più massiccia e la pioggia cade verso est per il prevalere dei venti occidentali. Così, la zona orientale del Canada subisce la caduta di pioggia acida a causa del carbone bruciato nel Midwest americano, mentre la Svezia risente della combustione del carbone effettuata nell'Europa occidentale.

I danni di tale inquinamento potranno aggravarsi in modo preoccupante, se l'impiego di combustibili fossili seguiterà a crescere. Già si tengono conferenze internazionali per far fronte a questo problema.

Per correggere questa situazione, si dovrebbero «pulire» carbone e petrolio prima di usarli - un processo che è possibile, ma che ovviamente fa salire il costo del combustibile. Tuttavia, anche se il carbone fosse carbonio puro e il petrolio fosse idrocarburo puro, non sarebbero eliminati tutti i problemi creati dalla loro combustione. Il carbonio bruciando dà origine a anidride carbonica, mentre l'idrocarburo dà origine a anidride carbonica e acqua. Si tratta di sostanze in se stesse relativamente poco dannose (benché sia inevitabile che si formi in qualche misura anche monossido di carbonio, che invece è decisamente tossico), e tuttavia la questione non può essere trascurata.

Tanto l'anidride carbonica che il vapore acqueo sono costituenti naturali dell'atmosfera. La quantità di vapore acqueo varia sia nel tempo che da luogo a luogo, mentre l'anidride carbonica è presente nella percentuale costante dello 0,03 per cento circa in peso. Il vapor d'acqua immesso nell'atmosfera a causa dell'impiego di combustibili fossili finisce negli oceani, dove costituisce un'aggiunta insignificante. Quanto all'anidride carbonica, in parte si scioglie nell'oceano e in parte reagisce con le rocce, ma un po' ne resta nell'atmosfera.

La quantità di anidride carbonica presente nell'atmosfera è aumentata della metà dal 1900 a oggi, grazie alla combustione di petrolio e carbone, e cresce di anno in anno in misura apprezzabile; essa non crea problemi per quanto riguarda la respirazione, anzi la si può addirittura considerare benefica per la vita vegetale. Essa, però, accresce leggermente l'effetto serra e innalza la temperatura media complessiva della terra, anche se in misura limitata. Anche qui, si tratta di effetti appena apprezzabili, ma l'aumento di temperatura tende a far innalzare la pressione di vapore dell'oceano e a mantenere nel complesso più vapor d'acqua nell'aria; anche questo accresce l'effetto serra.

È possibile, quindi, che l'impiego di combustibili fossili inneschi un aumento della temperatura tale da poter a sua volta innescare uno scioglimento delle calotte polari, con effetti disastrosi per le linee costiere dei continenti. Un altro effetto a lungo termine potrebbe essere un deterioramento del clima. Sussiste perfino una piccola probabilità che l'effetto serra assuma proporzioni dirompenti, facendo evolvere la terra verso uno stato analogo a quello di Venere; tuttavia dovremmo saperne molto di più sulla dinamica atmosferica e sugli effetti della temperatura per fare previsioni che non siano semplici congetture.

Comunque, è indispensabile considerare con grande prudenza la questione dell'impiego prolungato di combustibili fossili. Eppure i nostri bisogni di energia non diminuiranno, anzi aumenteranno in continuazione. Cosa dunque si può fare?

ENERGIA SOLARE.

Una possibilità consiste nel ricorrere maggiormente alle fonti rinnovabili di energia: vivere cioè del reddito energetico della terra, anziché attingere al capitale. Una di queste risorse può essere il legno, se si fanno crescere le foreste «mietendole» poi come un raccolto; ma il legno, da solo, non può assolutamente soddisfare il nostro fabbisogno globale di energia. Potremmo inoltre fare un uso molto maggiore dell'energia eolica e dell'energia idrica, che anch'esse, però, non possono essere nulla più che fonti sussidiarie di energia. Lo stesso si può dire di alcune altre fonti potenziali di energia esistenti sulla terra, come il calore presente al suo interno (energia geotermica, che si manifesta, per esempio, nelle sorgenti calde) o l'energia delle maree.

A lungo termine un interesse molto maggiore lo presenta la possibilità di attingere direttamente all'enorme quantità di energia che il sole riversa di continuo sulla terra. L'energia prodotta nell'unità di tempo dall'insolazione è pari a 50 mila volte il nostro attuale consumo energetico. Particolarmente promettente sotto questo aspetto è la "batteria solare", o "cella fotovoltaica", che si avvale della tecnologia dello stato solido per convertire direttamente la luce solare in elettricità.

La batteria solare, così come è stata realizzata nel 1954 dai Bell Telephone Laboratories, è un sandwich piatto di semiconduttori di tipo n e di tipo p, che fanno parte di un circuito elettrico. La luce solare che colpisce il semiconduttore ne estrae alcuni elettroni - secondo il consueto effetto fotoelettrico. Gli elettroni liberati si muovono verso il polo positivo, mentre le lacune si muovono verso il polo negativo, dando così origine a una corrente. Non viene prodotta molta corrente in confronto a una normale batteria chimica, ma il vantaggio della batteria solare è che non contiene liquidi né prodotti chimici corrosivi né parti mobili, ma seguita a generare indefinitamente elettricità, semplicemente stando esposta al sole.

Il satellite artificiale "Vanguard Primo", lanciato dagli Stati Uniti il 17 marzo 1958, è stato il primo equipaggiato con batterie solari per l'alimentazione dei segnali radio; essi seguitarono a essere emessi per anni, dato che non c'era un interruttore per spegnerli.

La quantità di energia che cade su un ettaro di terreno mediamente soleggiato è di 23,2 milioni di kilowatt/ora all'anno. Se si ricoprissero estese superfici delle regioni desertiche, come la Valle della Morte e il Sahara, di batterie solari e sistemi per immagazzinare l'elettricità, essi potrebbero soddisfare il fabbisogno mondiale di elettricità per un tempo indefinito - in pratica per tutto il tempo in cui è prevedibile che esisterà la razza umana, sempre che non si suicidi prima.

Naturalmente il punto debole è quello economico. I cristalli di silicio puro, tagliati in sottili fette per costruire le celle, sono costosi. Anche se il loro prezzo si è ridotto a 1 su 250 rispetto al 1958, l'elettricità solare costa ancora dieci volte di più di quella prodotta a partire dal petrolio.

Sicuramente nel futuro le batterie solari potranno diventare più economiche e più efficienti, ma raccogliere luce solare non è poi così facile come sembra. La luce solare è abbondante, ma diluita; per soddisfare il fabbisogno mondiale, essa andrebbe raccolta su superfici molto vaste, come ho già precisato; e poi, è notte per metà del tempo e anche di giorno possono esserci le nuvole, o la nebbia o la foschia.

Perfino l'aria pura nel deserto assorbe una notevole frazione della radiazione solare, specie quando il sole è basso sull'orizzonte. La conversione di luce solare in energia su queste vaste aree sarebbe comunque difficile e dispendiosa.

Alcuni scienziati suggeriscono di collocare centrali a energia solare in orbita intorno alla terra; in tali condizioni l'illuminazione solare sarebbe praticamente ininterrotta e non subirebbe le interferenze dell'atmosfera, e ciò consentirebbe una produzione sessanta volte maggiore per unità di

superficie; ma non è molto probabile che un simile progetto venga realizzato in un futuro immediato.

USO BELLICO DEL NUCLEO.

Tra l'attuale impiego su larga scala dei combustibili fossili e quello futuro su larga scala dell'energia solare vi è un'altra fonte di energia, disponibile in grandi quantità, che ha fatto la sua comparsa alquanto inaspettatamente meno di mezzo secolo fa e che ha la potenzialità di colmare il vuoto energetico del periodo intermedio.

Alludo all'"energia nucleare", l'energia immagazzinata nel minuscolo nucleo atomico.

L'energia nucleare viene chiamata talvolta "energia atomica", ma tale denominazione è alquanto inesatta; a rigor di termini, l'energia atomica è quella prodotta dalle reazioni chimiche, come la combustione del carbone o del petrolio, perché esse dipendono dal comportamento dell'atomo nel suo insieme. L'energia liberata dai cambiamenti che avvengono all'interno del nucleo ha natura del tutto diversa ed è quantitativamente molto superiore.

LA SCOPERTA DELLA FISSIONE.

Poco dopo la scoperta del neutrone da parte di Chadwick nel 1932, i fisici compresero di avere una chiave magica capace di dischiudere loro il nucleo. Il neutrone, essendo privo di carica elettrica, poteva penetrare facilmente nell'interno del nucleo, che è dotato di carica.

I fisici cominciarono immediatamente a bombardare vari nuclei con neutroni, per vedere quali reazioni nucleari sarebbero avvenute; tra i ricercatori che con più entusiasmo usarono questo nuovo strumento vi fu l'italiano Enrico Fermi: nel giro di pochi mesi, egli aveva ottenuto nuovi isotopi radioattivi di trentasette elementi diversi.

Fermi e il suo gruppo scoprirono che avevano risultati migliori se rallentavano i neutroni facendoli passare prima attraverso l'acqua o la paraffina, dove i neutroni, urtando i protoni, subivano un rallentamento come accade a una palla da biliardo quando colpisce altre biglie. Quando un neutrone è ridotto alla "velocità termica" (la normale velocità di moto degli atomi), ha una maggior probabilità di venir assorbito da un nucleo, perché resta più a lungo nelle sue vicinanze. Un altro modo di rendersi conto di quanto avviene è considerare che la lunghezza dell'onda associata al neutrone rallentato è maggiore, dato che essa è inversamente proporzionale alla quantità di moto della particella. Metaforicamente parlando, il neutrone diventa più «sfumato» e occupa un volume maggiore, pertanto esso colpisce più facilmente il nucleo, proprio come una boccia da bowling ha maggior probabilità di una palla da golf di colpire un birillo.

La probabilità che una data specie di nucleo catturi un neutrone è chiamata "sezione d'urto", termine che descrive metaforicamente il nucleo come un bersaglio di determinata grandezza: è più facile colpire con una palla da baseball il lato di un granaio che colpire alla stessa distanza un'asse larga trenta centimetri. Le sezioni d'urto dei nuclei per bombardamento con neutroni sono espresse in trilionesimi di trilionesimo di centimetro quadrato (10 alla meno ventiquattresima centimetri quadrati). Questa unità è stata in effetti chiamata "barn" (granaio) dai fisici americani M. G. Holloway e C. P. Baker nel 1942; il nome serviva a nascondere quanto stava realmente succedendo in quei febbrili giorni di guerra.

Quando un nucleo cattura un neutrone, il suo numero atomico resta immutato (perché la carica del nucleo rimane la stessa), ma il suo numero di massa sale di un'unità. L'idrogeno 1 diventa idrogeno 2, l'ossigeno 17 diventa ossigeno 18 e così via. L'energia conferita al nucleo dall'ingresso del neutrone può eccitare il nucleo, cioè accrescere il suo contenuto energetico. Questo surplus di energia viene poi emesso sotto forma di raggio gamma.

Il nuovo nucleo spesso è instabile. Per esempio, quando l'alluminio 27 cattura un neutrone e diventa alluminio 28, uno dei neutroni del nuovo nucleo decade immediatamente in un protone (emettendo un elettrone).

Questo aumento della carica positiva del nucleo trasmuta l'alluminio (numero atomico 13) in silicio (numero atomico 14).

Dato che il bombardamento con i neutroni è un facile metodo per convertire un elemento in quello successivo, Fermi pensò di bombardare l'uranio per vedere se si sarebbe formato un elemento artificiale - di numero atomico 93. Nei prodotti del bombardamento dell'uranio, egli e i suoi collaboratori trovarono tracce di nuove sostanze radioattive; credendo di aver ottenuto l'elemento 93, lo chiamarono "uranio X". Ma come identificare con certezza il nuovo elemento? Che tipo di proprietà chimiche avrebbe dovuto avere?

L'elemento 93, si pensava, avrebbe dovuto trovarsi nella tavola periodica sotto il renio, al quale avrebbe dovuto quindi essere simile dal punto di vista chimico. (In realtà, anche se nessuno allora lo comprese, l'elemento 93 apparteneva a una nuova serie di terre rare, il che significava che era simile all'uranio, non al renio - vedi capitolo sesto. Pertanto la ricerca per la sua identificazione era partita decisamente con il piede sbagliato.) Se era simile al renio, forse la piccola quantità di «elemento 93» creata avrebbe potuto essere isolata mescolando i prodotti del bombardamento con il renio, e poi separando il renio con metodi chimici. Il renio avrebbe agito da "trasportatore", portando con sé l'«elemento 93», chimicamente simile. Se il renio avesse manifestato proprietà radioattive, ciò avrebbe indicato la presenza dell'elemento 93.

Otto Hahn e Lise Meitner, gli scopritori del protoattinio, lavorando insieme a Berlino, seguirono questa linea sperimentale. L'elemento 93 non risultò presente insieme al renio. Hahn e la Meitner allora cercarono di stabilire se il bombardamento con i neutroni avesse trasformato l'uranio in altri elementi vicini nella tavola periodica.

A questo punto - si era nel 1938 - ci fu l'occupazione dell'Austria da parte della Germania: la Meitner, che fino ad allora, come cittadina austriaca, era stata al sicuro nonostante fosse ebrea, fu obbligata a scappare dalla Germania di Hitler, rifugiandosi a Stoccolma. Hahn continuò il proprio lavoro con il fisico tedesco Fritz Strassman.

Alcuni mesi più tardi, Hahn e Strassman scoprirono che il bario, mescolato all'uranio bombardato, trasportava con sé tracce di radioattività, e pensarono che essa fosse dovuta al radio, l'elemento che sta sotto il bario nella tavola periodica. Conclusero quindi che, bombardando l'uranio con neutroni, se ne trasformava una parte in radio.

Ma questo radio si dimostrava assai strano: per quanto tentassero, Hahn e Strassman non riuscivano a separarlo dal bario. In Francia Irène Joliot-Curie e il suo collaboratore P. Savitch fecero lo stesso tentativo con analoghi esiti negativi.

Poi la Meitner, dal suo rifugio in Scandinavia, svelò coraggiosamente il mistero, rendendo di pubblico dominio un'idea che Hahn stava esprimendo in privato, ma che esitava a pubblicare. In una lettera comparsa nella rivista inglese «Nature» nel gennaio 1939, la Meitner chiarì che non riusciva a separare il «radio» dal bario per la semplice ragione che non vi era affatto del radio. Il presunto radio era in realtà bario radioattivo: era bario ottenuto bombardando l'uranio con i neutroni! Questo bario radioattivo decadeva emettendo una particella beta e trasformandosi in lantanio. (Hahn e Strassman avevano scoperto che, aggiungendo del comune lantanio ai prodotti del bombardamento, questo trasportava con sé una certa radioattività, che però essi avevano attribuito all'attinio; in realtà si trattava di lantanio radioattivo.)

Ma come aveva potuto formarsi del bario a partire dall'uranio? Il bario era un atomo di peso intermedio, e nessun processo noto di decadimento radioattivo poteva trasformare un elemento pesante in uno avente metà del suo peso. La Meitner giunse arditamente a concludere che il nucleo dell'uranio si fosse spaccato in due. L'assorbimento di un neutrone aveva provocato quella che fu da lei definita "fissione".

I due elementi in cui si era spezzato, sosteneva la Meitner, erano il bario e l'elemento 43, quello al di sopra del renio nella tavola periodica. Un nucleo di bario e uno dell'elemento 43 (che in seguito fu chiamato "tecnezio") insieme avrebbero costituito un nucleo di uranio. L'intuizione era particolarmente audace perché il bombardamento con i neutroni forniva solo 6 milioni di elettronvolt, e quanto si sapeva a quei tempi sulla struttura del nucleo faceva pensare che, per ottenere un effetto del genere, ci sarebbero voluti centinaia di milioni di elettronvolt.

Il nipote della Meitner, Otto Robert Frisch, si affrettò a recarsi in Danimarca per sottoporre la nuova teoria a Bohr, ancor prima della pubblicazione. Bohr si trovò di fronte al problema della sorprendente facilità con cui - secondo la nuova ipotesi - si sarebbe potuto spaccare in due il nucleo, ma fortunatamente in quel periodo egli stava lavorando intorno alla teoria della struttura nucleare a goccia liquida, e ritenne che tale teoria sarebbe riuscita a spiegare la cosa. (Negli anni seguenti tale teoria, completata con il concetto di strato nucleare, avrebbe spiegato nei minimi dettagli il fenomeno della fissione, compresa la ragione per cui il nucleo si spacca in due parti disuguali.) In tutti i casi, teoria o no, Bohr afferrò immediatamente tutte le implicazioni; egli stava proprio partendo alla volta di Washington, per partecipare a un congresso di fisica teorica; lì Bohr mise al corrente i fisici di ciò che era venuto a sapere in Danimarca a proposito dell'ipotesi della fissione. Eccitatissimi, i fisici tornarono ai loro laboratori per verificare tale ipotesi, e, nel giro di un mese, erano state comunicate una mezza dozzina di conferme sperimentali. Il premio Nobel per la chimica del 1944 andò ad Hahn.

LA REAZIONE A CATENA.

La fissione liberava una quantità straordinaria di energia, di gran lunga maggiore di quella liberata dalla semplice radioattività. Ma non era solo questa energia in più a rendere la fissione un fenomeno così portentoso. Ancora più importante era il fatto che nella reazione venivano liberati due o tre neutroni. Nel giro di due mesi dalla pubblicazione della lettera della Meitner, parecchi fisici avevano intuito la terribile possibilità di una "reazione nucleare a catena".

Una reazione a catena è un fenomeno comune in chimica. Anche un pezzo di carta che brucia è una reazione a catena. Un fiammifero fornisce il calore necessario per innescare la reazione; una volta cominciata la combustione, è essa stessa a fornire il calore, necessario per mantenere e diffondere la fiamma. La combustione produce altra combustione, su scala sempre più vasta.

Tutto ciò è piuttosto simile a quanto avviene in una reazione a catena nucleare. Un neutrone provoca la fissione di un nucleo di uranio, liberando due neutroni che possano produrre due fissioni, che a loro volta liberano quattro neutroni che possano produrre quattro fissioni, e così via. La fissione del primo atomo produce 200 Mev di energia; il passo successivo ne produce 400, quello ancora successivo 800, poi 1600, e così via. Dato che i passi successivi si susseguono a intervalli di circa un cinquantesimo di trilionesimo di secondo, è facile capire che entro una piccolissima frazione di secondo viene liberata una quantità sbalorditiva di energia. (In realtà il numero medio dei neutroni prodotti in una fissione è 2,47, così che le cose vanno ancora più velocemente di quanto indicano i nostri calcoli semplificati.) La fissione di un chilogrammo di uranio produce altrettanta energia quanto la combustione di quasi 3000 tonnellate di carbone o di oltre 3 milioni di litri di petrolio. Usata a fini pacifici, la fissione dell'uranio potrebbe, in teoria, cancellare tutte le nostre preoccupazioni immediate circa l'esaurimento dei combustibili fossili e la crescita del nostro consumo energetico.

Ma la scoperta della fissione avvenne proprio quando il mondo stava per essere sommerso da una guerra senza quartiere. I fisici stimarono che la fissione di 1 chilogrammo di uranio avrebbe fornito una potenza esplosiva pari a circa 20 mila tonnellate di T.N.T. (tritolo). Il pensiero delle conseguenze di una guerra combattuta con armi di questo genere era orribile, ma l'idea di un mondo

in cui la Germania nazista avesse posto le mani su un simile esplosivo prima degli Alleati era ancora più orribile.

Il fisico americano di origine ungherese Leo Szilard, che meditava da anni sulle reazioni nucleari a catena, previde il futuro possibile con estrema lucidità. Insieme ad altri due fisici ungheresi-americani, Eugene Wigner e Edward Teller, egli convinse il gentile e pacifico Einstein, nell'estate del 1939, a scrivere una lettera al presidente Franklin Delano Roosevelt, esponendo le potenzialità offerte dalla fissione dell'uranio e suggerendo che si facesse ogni sforzo per sviluppare quest'arma prima che vi riuscissero i nazisti.

La lettera fu scritta il 2 agosto 1939 e fu consegnata al presidente l'11 ottobre del 1939. Tra queste due date c'era stato lo scoppio della seconda guerra mondiale in Europa. I fisici della Columbia University, sotto la direzione di Fermi, che aveva lasciato l'Italia per l'America l'anno prima, erano al lavoro per realizzare la fissione autosostenuta di una grande quantità di uranio.

Alla fine, lo stesso governo degli Stati Uniti prese provvedimenti sulla scorta della lettera di Einstein. Il 6 dicembre 1941 il presidente Roosevelt (assumendosi un grosso rischio politico, in caso di insuccesso) autorizzò l'organizzazione di un progetto gigantesco, che prese il nome volutamente vago di Manhattan Engineer District; il progetto consisteva nel mettere a punto una bomba atomica. Il giorno dopo i giapponesi attaccarono Pearl Harbor e gli Stati Uniti si trovarono in guerra.

LA PRIMA PILA ATOMICA.

Come c'era da aspettarsi, la pratica non seguì certo facilmente alla teoria, ma ci volle un gran lavoro per mettere a punto una reazione a catena. In primo luogo occorreva una notevole quantità di uranio sufficientemente puro perché i neutroni non andassero sprecati restando assorbiti dalle impurità. L'uranio è un elemento abbastanza comune nella crosta terrestre: in media sono presenti 2 grammi di uranio per tonnellata di roccia; l'uranio pertanto è 400 volte più abbondante dell'oro. Ma è anche molto disperso, così che sono rari i luoghi nel mondo in cui lo si trova in minerali ricchi o anche solo in concentrazione ragionevole. Inoltre, prima del 1939, quasi non esistevano utilizzazioni dell'uranio e quindi neppure tecnologie per la sua purificazione. Fino ad allora era stata prodotta negli Stati Uniti meno di un'oncia (28,35 grammi) di uranio metallico.

Sotto la direzione di Spedding i laboratori dello Iowa State College si misero a studiare il problema della purificazione mediante resine scambiatrici di ioni (vedi capitolo sesto), e nel 1942 cominciarono a produrre uranio metallico ragionevolmente puro.

Ma questo non era che un primo passo. A quel punto si dovevano separare le frazioni più fissili dell'uranio. L'isotopo uranio 238 (U 238) ha un numero pari di protoni (92) e un numero pari di neutroni (146): i nuclei con un numero pari di nucleoni sono più stabili di quelli con un numero dispari. L'altro isotopo dell'uranio naturale - l'uranio 235 - ha un numero dispari di neutroni (143); ciò aveva consentito a Bohr di prevedere che la fissione dell'uranio 235 sarebbe stata più facile di quella dell'uranio 238. Nel 1940 un gruppo di ricerca, sotto la guida del fisico americano John Ray Dunning, isolò una piccola quantità di uranio 235 e dimostrò che la congettura di Bohr era esatta. La fissione dell'U 238 avviene solo quando esso è colpito da neutroni veloci dotati di un'energia superiore a una certa soglia, mentre per la fissione dell'U 235 sono sufficienti neutroni di qualsiasi energia, addirittura anche i semplici neutroni termici.

Il problema era che nell'uranio naturale purificato solo un atomo su 140 è U 235, mentre il resto è U 238; pertanto la maggior parte dei neutroni liberati nella fissione dell'U 235 venivano catturati da atomi di U 238 senza produrre fissione alcuna. Anche bombardando l'uranio con neutroni abbastanza veloci da scindere l'U 238, i neutroni liberati dalla fissione dell'U 238 non avevano energia sufficiente a sostenere una reazione a catena negli atomi restanti di questo isotopo più comune. In altre parole, la presenza dell'U 238 smorzava la reazione a catena, fino a farla estinguere, un po' come se si cercasse di far bruciare delle foglie bagnate.

Non restava altro da fare, allora, che cercare di separare su grande scala l'U 235 dall'U 238, o almeno tentare di asportare abbastanza U 238 da ottenere un sostanziale arricchimento del contenuto di U 235 nel miscuglio. I fisici affrontarono il problema con vari metodi, ciascuno dei quali offriva solo una debole speranza di successo.

Quello che finì per funzionare meglio fu la "diffusione gassosa", che è rimasto il metodo preferito fino al 1960, nonostante i suoi costi spaventosi. Uno scienziato della Germania occidentale ha in seguito elaborato una tecnica molto più economica per isolare l'U 235, la "centrifugazione": le molecole più pesanti vengono proiettate verso l'esterno, separandosi da quelle più leggere, che contengono l'U 235.

Questo processo mette alla portata economica delle potenze minori la fabbricazione delle bombe nucleari, fatto non del tutto desiderabile.

La massa dell'atomo dell'uranio 235 è inferiore dell'1,3 per cento a quella dell'uranio 238; di conseguenza se gli atomi fossero nello stato gassoso, quelli dell'U 235 sarebbero un po' più veloci di quelli dell'U 238, dai quali, proprio per la loro più veloce diffusione, si separerebbero passando attraverso una serie di barriere filtranti. Ma per utilizzare questo principio, si doveva prima disporre di uranio allo stato gassoso. A tale scopo si ricorse all'unico (o quasi) metodo possibile: combinarlo con il fluoro, ottenendo l'"esafluoruro di uranio", un liquido volatile composto di un atomo di uranio e sei di fluoro; in questo composto una molecola contenente U 235 è più leggera di meno dell'1 per cento di una molecola contenente U 238, una differenza che si è comunque dimostrata sufficiente perché il metodo funzionasse.

Si fece quindi passare il vapore di esafluoruro di uranio sotto pressione attraverso barriere porose; a ogni passaggio le molecole contenenti U 235 guadagnavano, in media, un po' di terreno e tale vantaggio a favore dell'U 235 si accumulava attraversando le varie barriere successive. Ci sarebbero volute, però, migliaia di barriere per ottenere quantità notevoli di esafluoruro di uranio 235 quasi puro; ma ne bastava un numero molto più piccolo per ottenere una concentrazione sufficientemente arricchita di U 235.

Nel 1942, si aveva ormai la ragionevole certezza che il metodo della diffusione gassosa (insieme a uno o due altri) era in grado di produrre uranio arricchito in gran quantità: vennero allora costruiti degli impianti di separazione (che costarono un miliardo di dollari ciascuno e consumavano altrettanta elettricità quanto la città di New York) nella cittadina segreta di Oak Ridge, nel Tennessee, chiamata talvolta, da scienziati irriverenti, Dogpatch, come città immaginaria di "Li'l Abner" nelle storie di Al Capp.

Nel frattempo i fisici calcolarono la "dimensione critica" necessaria perché una reazione a catena si autosostenga. Se il blocco di uranio arricchito è troppo piccolo, dalla sua superficie sfuggono troppi neutroni senza essere assorbiti dagli atomi di U 235; per minimizzare questa perdita, il pezzo d'uranio deve avere un volume grande rispetto alla superficie. Raggiunta una certa dimensione critica, i neutroni intercettati dagli atomi di U 235 saranno in numero sufficiente per tenere in vita una reazione a catena.

I fisici scoprirono anche un modo per accrescere il rendimento dei neutroni disponibili. Come ho già detto, i neutroni "termici" (cioè, lenti) sono assorbiti dall'uranio 235 meglio di quelli veloci; pertanto, si ricorse a un "moderatore", che facesse diminuire le alte velocità con cui i neutroni emergevano dalle reazioni di fissione.

L'acqua comune sarebbe stata un ottimo agente di rallentamento, ma purtroppo i nuclei dell'idrogeno ordinario catturavano troppi neutroni. Il deuterio (idrogeno 2) assolveva il compito assai meglio, non avendo in pratica tendenza ad assorbire neutroni; pertanto, ai fini della fissione, acquistò un grande interesse la produzione di ingenti quantitativi di acqua pesante.

Fino al 1943, essa veniva preparata soprattutto per elettrolisi; l'acqua ordinaria si dissocia in idrogeno e ossigeno più facilmente dell'acqua pesante: pertanto, dopo l'elettrolisi di una grande quantità di acqua, quella che resta alla fine è ricca di acqua pesante. Dopo il 1943, il metodo

favorito fu quello della distillazione frazionata. L'acqua ordinaria ha punto di ebollizione più basso; pertanto il residuo finale di acqua non ancora evaporata è ricco di acqua pesante.

Nei primi anni quaranta l'acqua pesante era diventata preziosa. La storia di come i Joliot-Curie riuscirono a far uscire le riserve francesi di acqua pesante dal paese al momento dell'occupazione nazista, nel 1940, è rocambolesca. Circa 500 litri di acqua pesante, che erano stati prodotti in Norvegia, caddero nelle mani dei nazisti tedeschi e furono distrutti dal raid di un commando inglese nel 1942.

Tuttavia anche l'acqua pesante aveva i suoi inconvenienti: avrebbe potuto evaporare quando la reazione a catena avesse raggiunto temperature altissime, e avrebbe corroso l'uranio. Gli scienziati impegnati nel Progetto Manhattan decisero di usare come moderatore il carbonio, sotto forma di grafite molto pura.

Un altro moderatore possibile, il berillio, presentava lo svantaggio della tossicità; la "berilliosi" fu infatti riscontrata per la prima volta proprio all'inizio degli anni quaranta in uno dei fisici che lavoravano alla bomba atomica.

Ora, cerchiamo di immaginare come avvenga una reazione a catena. Si comincia con l'inviare un fascio di neutroni di innesco nel complesso costituito da moderatore e uranio arricchito. Un certo numero di atomi di uranio 235 subisce la fissione, liberando dei neutroni, che a loro volta colpiscono altri atomi di uranio 235; anche questi subiscono la fissione e liberano ulteriori neutroni, alcuni dei quali verranno assorbiti da atomi che non sono di U 235, mentre altri ancora sfuggiranno dalla pila. Ma se in ogni fissione 1 neutrone (esattamente 1) ha l'effetto di produrre un'altra fissione, allora la reazione a catena sarà autosostenuta. Se il "fattore di moltiplicazione" è maggiore di uno, anche di pochissimo (per esempio, se è 1,001), la reazione a catena crescerà rapidamente, fino a provocare un'esplosione. Questo va bene nel caso delle bombe, ma non certo per gli scopi sperimentali. Era quindi necessario trovare un modo per tenere sotto controllo il processo di fissione: ciò poteva essere ottenuto inserendo delle barre di una sostanza come il cadmio, che ha un'elevata sezione d'urto per la cattura dei neutroni. La reazione a catena si sviluppa così rapidamente che le barre di controllo di cadmio non potrebbero essere inserite con sufficiente rapidità se non fosse per il fortunato particolare che gli atomi di uranio non emettono tutti i loro neutroni all'istante, durante la fissione. Circa 1 neutrone ogni 150 è un "neutrone ritardato", viene cioè emesso qualche minuto dopo la fissione, perché non proviene direttamente dagli atomi di uranio che hanno subito la fissione, ma da atomi più piccoli, formatisi nel corso della fissione stessa. Quando il fattore di moltiplicazione supera di poco l'unità, questo ritardo basta per dare il tempo di inserire le barre che controllano la reazione.

Nel 1941, vennero condotti degli esperimenti con miscugli di uranio e grafite; l'informazione raccolta fu sufficiente perché i fisici ritenessero che, anche senza uranio arricchito, fosse possibile innescare una reazione a catena, se si fosse usato un pezzo di uranio abbastanza grande.

I fisici si accinsero allora a costruire un reattore di dimensioni critiche all'Università di Chicago. A quell'epoca erano disponibili circa sei tonnellate di uranio puro, che furono integrate con ossido di uranio. Vennero sovrapposti strati alterni di uranio e grafite: cinquantasette strati in tutto, attraversati da fori in cui fosse possibile inserire le barre di controllo di cadmio. La struttura venne chiamata "pila" - un evasivo nome in codice, che non ne rivelava la vera funzione. (Durante la prima guerra mondiale, per analogo scopo di segretezza vennero chiamati "tank" i carri armati; tale nome restò in uso, mentre la denominazione "pila atomica" fu sostituita da quella più appropriata di "reattore nucleare".)

La pila di Chicago, costruita sotto lo stadio da football, aveva una larghezza di 9 metri, una lunghezza di 9,75 metri e un'altezza di 6,5 metri: pesava 1300 tonnellate e ne conteneva 46 di uranio, fra metallo e ossido. (Si sa che, usando uranio 235 puro, la massa critica non avrebbe superato i 255 grammi.) Il 2 dicembre 1942 le barre di controllo di cadmio vennero estratte

lentamente. Alle 15,45 il fattore di moltiplicazione raggiunse il valore 1: era in corso una reazione di fissione autosostenuta. In quel momento l'umanità entrava, senza saperlo, nell'Era Nucleare.

Il fisico che dirigeva il progetto era Enrico Fermi: Eugene Wigner gli offrì una bottiglia di Chianti per celebrare il momento storico. Arthur Compton, anch'egli presente, fece una telefonata interurbana a James Bryant Conant ad Harvard, annunciandogli il successo: «Il navigatore italiano,» egli disse, «è giunto nel Nuovo Mondo». Conant chiese: «Come erano gli indigeni?». La pronta risposta fu: «Molto amichevoli!».

È curioso e interessante il fatto che il primo navigatore italiano scoprì un mondo nuovo nel 1492, e il secondo ne scoprì un altro nel 1942.

L'ERA NUCLEARE.

Nel frattempo si era scoperto un altro combustibile adatto per la fissione: l'uranio 238, dopo aver assorbito un neutrone termico, diventa uranio 239, che ben presto decade in nettunio 239, il quale a sua volta si disintegra con analoga rapidità dando origine al plutonio 239.

Il plutonio 239, avendo nel nucleo un numero dispari di neutroni (145) ed essendo più complesso dell'uranio 235, dovrebbe essere molto instabile. Sembrava logico prevedere che il plutonio 239 subisse la fissione per effetto dei neutroni termici; nel 1941 questa previsione venne confermata sperimentalmente; non sapendo ancora con certezza se la separazione dell'U 235 si sarebbe rivelata concretamente realizzabile, i fisici decisero di mettersi le spalle al sicuro, tentando di produrre il plutonio su vasta scala.

Speciali reattori furono costruiti nel 1943 a Oak Ridge e ad Hanford, nello stato di Washington, per preparare il plutonio. Essi costituivano un grande passo avanti rispetto alla pila di Chicago. Per prima cosa erano progettati in modo che fosse possibile estrarne periodicamente l'uranio; il plutonio prodotto poteva essere separato dall'uranio con mezzi chimici; anche i prodotti di fissione, alcuni dei quali assorbivano molto i neutroni, potevano venir separati e rimossi. Inoltre, i nuovi reattori erano raffreddati ad acqua, per prevenire il surriscaldamento. (La pila di Chicago poteva funzionare solo per brevi periodi, perché era raffreddata esclusivamente ad aria.)

Nel 1945 erano ormai disponibili quantità di uranio 235 e di plutonio 239 sufficienti per costruire delle bombe. Questa parte del progetto fu realizzata in una terza città segreta, Los Alamos, nel Nuovo Messico, sotto la direzione del fisico americano J. Robert Oppenheimer.

Per costruire una bomba era necessario accelerare il più possibile i tempi della reazione a catena, il che richiedeva l'uso di neutroni veloci per ridurre l'intervallo tra una fissione e l'altra. Venne pertanto eliminato il moderatore e la bomba venne chiusa in un massiccio involucro per tenere insieme l'uranio finché buona parte di esso subisse la fissione.

Dato che una massa critica di materiale fissile sarebbe esplosa spontaneamente (innescata dai neutroni vaganti presenti nell'aria), il combustibile per la bomba venne suddiviso in due o più sezioni. Il meccanismo di innesco era un esplosivo convenzionale, che provocava il contatto delle varie sezioni al momento della detonazione: un dispositivo era chiamato «Thin Man» (uomo magro) - un tubo con due pezzi di uranio 235 agli estremi - mentre un altro, detto «Fat Man» (uomo grasso), aveva la forma di una palla in cui un guscio composto di materiale fissile "implodeva" verso il centro; per effetto dell'implosione e di un pesante involucro esterno, detto "tamper", veniva allora a formarsi momentaneamente una densa massa critica.

L'involucro aveva anche la funzione di riflettere i neutroni rinviandoli nella massa in cui era in corso la fissione, riducendo in tal modo le dimensioni critiche.

Sperimentare su scala ridotta questo ordigno era impossibile. Per funzionare, la bomba doveva superare la dimensione critica. Di conseguenza, la prima verifica fu l'esplosione di una bomba a fissione nucleare vera e propria, chiamata di solito, ma impropriamente, "bomba atomica", o bomba-A. Alle 5,30 del 16 luglio 1945 ad Alamogordo, nel Nuovo Messico, venne fatta esplodere una bomba, che ebbe effetti veramente terrificanti: la sua potenza esplosiva era pari a 20 mila

tonnellate di T.N.T. Si narra che I. I. Rabi, a cui venne chiesto più tardi cosa avesse visto, abbia risposto con tristezza: «Non posso dirvelo, ma non aspettatevi di morire di morte naturale». (È doveroso riferire anche che la persona che ricevette questa risposta morì, qualche anno dopo, proprio di morte naturale.)

Furono preparate altre due bombe a fissione. Una era una bomba all'uranio chiamata «Little Boy», lunga 3 metri e larga 60 centimetri, del peso di 4 tonnellate, che fu sganciata su Hiroshima il 6 agosto 1945; a farla esplodere fu un'onda radar. Alcuni giorni dopo, fu sganciata su Nagasaki la seconda bomba, una bomba al plutonio, di 3,3 per 1,5 metri, del peso di 4,5 tonnellate, chiamata «Fat Man». Insieme le due bombe avevano la potenza esplosiva di 35 mila tonnellate di T.N.T. Con il bombardamento di Hiroshima l'Era Nucleare, che pure era iniziata già da tre anni, giunse clamorosamente a conoscenza del mondo.

Durante i quattro anni che seguirono, gli americani si cullarono nell'illusione che la bomba nucleare potesse rimanere segreta, solo che opportune misure di sicurezza ne impedissero la costruzione in altre nazioni. In realtà, gli studi teorici e la sperimentazione pratica relativi alla fissione nucleare erano già a conoscenza degli scienziati di altri paesi fin dal 1939, e l'Unione Sovietica era impegnata a fondo in questo settore di ricerca fin dal 1940. Se la seconda guerra mondiale non avesse impegnato le risorse di quella nazione (certo inferiori a quelle degli Stati Uniti), assai più di quanto non impegnasse quelle della nazione americana, nella sua posizione di paese non invaso, l'URSS avrebbe potuto avere una bomba nucleare nel 1945, come gli Stati Uniti. Comunque, l'Unione Sovietica fece esplodere la sua prima bomba nucleare il 22 settembre 1949, suscitando sgomento e sorpresa (abbastanza fuori luogo) nella maggior parte degli americani. La bomba sovietica aveva una potenza sei volte maggiore di quella di Hiroshima e un effetto esplosivo pari a 200 mila tonnellate di T.N.T.

Il 3 ottobre 1952, la Gran Bretagna divenne la terza potenza nucleare con l'esplosione di una propria bomba sperimentale. Il 13 febbraio 1960, la Francia si unì al «club nucleare» come quarto membro, facendo esplodere nel Sahara una bomba al plutonio. Il 16 ottobre 1964, la Repubblica popolare cinese annunciò l'esplosione di una bomba nucleare, e diventò il quinto membro del club. Nel maggio 1974, l'India fece esplodere la propria bomba nucleare, per la quale aveva usato del plutonio sottratto surrettiziamente da un reattore (destinato a scopi pacifici) che le era stato fornito dal Canada, e divenne il sesto membro. Da allora parecchi paesi, tra cui Israele, il Sudafrica, l'Argentina e l'Iraq, sono stati sospettati di essere sul punto di dotarsi di armi nucleari.

Questa proliferazione nucleare è diventata motivo di allarme per molti. È già molto preoccupante vivere sotto la minaccia di una guerra nucleare a cui potrebbe dar inizio una delle due superpotenze - le quali per altro si sono astenute dall'usare le loro armi atomiche per quarant'anni nella consapevolezza delle catastrofiche conseguenze di uno scontro nucleare. Ma essere alla mercé delle piccole potenze, che possono agire in base a reazioni di rabbia, spinte da interessi locali e guidate da governanti di vedute mentali ristrette, sembrerebbe proprio intollerabile.

LA REAZIONE TERMONUCLEARE.

Nel frattempo la bomba a fissione è diventata un'arma superata: gli uomini sono riusciti a innescare un'altra reazione nucleare capace di produrre bombe ancora più devastanti.

Nella fissione dell'uranio, lo 0,1 per cento della massa del suo atomo si converte in energia; nella fusione degli atomi di idrogeno in cui si forma l'elio, non meno dello 0,5 per cento della loro massa si converte in energia, come era stato messo in evidenza per la prima volta nel 1915 dal chimico americano William Draper Harkins. A temperature di milioni di gradi, l'energia dei protoni è abbastanza alta per consentire la loro fusione: così due protoni possono unirsi, e dopo aver emesso un positrone e un neutrino (un processo che converte uno dei protoni in un neutrone) costituire un nucleo di deuterio; questo, a sua volta, può fondersi con un protone dando origine a un

nucleo di tritio, che può fondersi con un altro protone formando elio 4; oppure i nuclei di deuterio e di tritio possono combinarsi in vari modi, sempre formando elio 4.

Queste reazioni nucleari possono avvenire soltanto in presenza di altissime temperature: pertanto vengono chiamate "reazioni termonucleari". Negli anni trenta, si pensava che l'unico luogo in cui potessero esistere le temperature necessarie fosse il centro delle stelle; nel 1938 il fisico di origine tedesca Hans Albrecht Bethe (che aveva lasciato la Germania di Hitler nel 1935, stabilendosi negli Stati Uniti) aveva avanzato l'idea che reazioni di fusione fossero responsabili dell'energia irradiata dalle stelle. Fu la prima spiegazione del tutto soddisfacente dell'energia stellare avanzata da quando Helmholtz aveva sollevato il problema, circa un secolo prima.

Ora, la bomba basata sulla fissione dell'uranio forniva le temperature necessarie, sulla terra; essa poteva fungere da fiammifero abbastanza caldo per innescare nell'idrogeno una reazione di fusione a catena.

Per un certo tempo si dubitò che fosse possibile utilizzare una simile reazione per fabbricare una bomba: per prima cosa, il combustibile, cioè l'idrogeno sotto forma di una miscela di deuterio e di tritio, doveva formare una massa assai densa, il che significava che doveva essere liquefatto e mantenuto a una temperatura solo pochi gradi sopra lo zero assoluto. In altri termini, si sarebbe dovuto far esplodere un frigorifero di grande massa, ma soprattutto, anche supposto che fosse possibile fabbricare una bomba all'idrogeno, a cosa sarebbe servita?

La bomba a fissione era già sufficientemente devastante da radere al suolo intere città; una bomba all'idrogeno non avrebbe fatto che accrescere le distruzioni e spazzare via intere popolazioni civili.

Malgrado queste prospettive poco attraenti, Stati Uniti e Unione Sovietica si sentirono obbligati a proseguire su questa strada. La Commissione per l'energia atomica degli Stati Uniti provvide alla produzione di una certa quantità di tritio, predispose un ordigno da 60 tonnellate basato sulla fissione-fusione su un atollo corallino del Pacifico e, il primo novembre 1952, provocò la prima esplosione termonucleare nella storia del nostro pianeta (una "bomba all'idrogeno", o "bomba H"). Essa confermò le più spaventose previsioni: l'esplosione produsse l'equivalente di 10 milioni di tonnellate di T.N.T. (10 megaton) - 500 volte i miserabili 20 chiloton di energia della bomba di Hiroshima. L'atollo fu spazzato via dall'esplosione.

I russi non erano molto in ritardo: il 12 agosto 1953 a loro volta provocarono un'esplosione termonucleare con una bomba abbastanza leggera da essere trasportata con un aereo. Gli americani produssero una bomba H trasportabile solo nel 1954; mentre a loro erano occorsi sette anni e mezzo dopo la bomba a fissione per mettere a punto la bomba a fusione, ai russi bastarono cinque anni.

Intanto era stato elaborato un progetto per generare una reazione termonucleare a catena in modo più semplice, confinandola in una bomba portatile. La chiave per questa reazione fu fornita dall'elemento litio. Quando l'isotopo litio 6 assorbe un neutrone, esso si scinde in un nucleo di elio e uno di tritio, emettendo 4,8 Mev di energia.

Supponiamo ora di usare come combustibile un composto del litio e dell'idrogeno, quest'ultimo sotto forma di deuterio; questo composto è solido, così non occorre il refrigerante per condensare il combustibile: una fissione di innesco fornirà neutroni per la scissione del litio; il calore dell'esplosione causerà la fusione del deuterio presente nel composto e del tritio prodotto dalla fissione del litio. In altri termini, avverranno varie reazioni energetiche: la fissione del litio, la fusione del deuterio con altro deuterio e la fusione del deuterio con il tritio.

Ora, oltre a liberare energie tremende, queste reazioni producevano anche un gran numero di neutroni in eccesso. I costruttori della bomba si chiesero: perché non usare questi neutroni per la fissione di una massa di uranio? Si può provocare la fissione anche nel comune uranio 238, purché i neutroni siano molto veloci (anche se più difficilmente che nell'uranio 235). La violenta esplosione di neutroni veloci prodotti dalle reazioni di fusione potrebbe provocare la fissione di un considerevole numero di atomi di U 238; supponiamo di costruire una bomba con un nocciolo di U 235 (per l'innesco) che abbia intorno una carica esplosiva di deuteruro di litio, il tutto avvolto da un

mantello di uranio 238 che funga anch'esso da esplosivo. Si avrebbe una bomba davvero potente. Si potrebbe dare qualsiasi spessore si desideri al mantello di U 238, perché questo non ha una dimensione critica oltre la quale la reazione a catena avviene spontaneamente.

Ciò che risulta viene chiamato talvolta "bomba U".

Anche questa bomba venne costruita. E fu anche fatta esplodere, a Bikini, nelle Isole Marshall, il primo marzo 1954: il turbamento fu grande in tutto il mondo. L'energia prodotta si aggirava sui 15 megaton. Ancora più drammatica fu una pioggia di particelle radioattive da cui furono investiti ventitré pescatori giapponesi che si trovavano sul peschereccio "The Lucky Dragon". La radioattività distrusse il carico di pesce, fece ammalare i pescatori, uno dei quali finì per morire, e non migliorò certo la salute del resto dell'umanità.

Dal 1954 in poi le bombe termonucleari sono entrate a far parte dell'arsenale degli Stati Uniti, dell'Unione Sovietica e della Gran Bretagna. Nel 1967 la Cina divenne il quarto membro del «club termonucleare»: aveva impiegato solo tre anni per passare dalla fissione alla fusione termonucleare. L'Unione Sovietica ha fatto esplodere bombe all'idrogeno di potenza compresa tra 50 e 100 megaton, e gli Stati Uniti sono perfettamente in grado di costruirne anche di più grandi, in breve tempo.

Negli anni settanta vennero sviluppate bombe nucleari che minimizzavano l'effetto esplosivo e massimizzavano la radiazione, particolarmente di neutroni, il che significa un minor danno alle cose e uno maggiore agli esseri umani. Queste "bombe al neutrone" piacciono a chi tiene in gran conto i beni materiali e in poco conto la vita umana.

Le prime bombe nucleari, usate negli ultimi giorni della seconda guerra mondiale, furono sganciate da aeroplani. Oggi è possibile lanciarle mediante "missili balistici intercontinentali" (I.C.B.M.), che si avvalgono di razzi; il loro lancio, mirato con estrema precisione, può essere effettuato da qualsiasi punto della terra verso qualsiasi altro punto. Stati Uniti e Unione Sovietica hanno entrambi grandi arsenali di tali missili, tutti suscettibili di essere armati con testate nucleari.

Per questa ragione una guerra termonucleare generale tra le due superpotenze, se ingaggiata senza quartiere da entrambe le parti, può porre fine alla civiltà (e, forse, a gran parte delle capacità della terra di sostentare la vita) in non più di mezz'ora. Se mai è esistito al mondo un argomento di riflessione capace di far rinsavire, si direbbe che è proprio questo.

USO PACIFICO DEL NUCLEO.

L'uso drammatico dell'energia nucleare sotto forma di bombe dall'incredibile potere distruttivo ha contribuito a far apparire lo scienziato nel ruolo dell'orco più di qualsiasi altro fatto avvenuto dalle origini della scienza. In un certo senso ciò è giustificato, perché nessuna argomentazione o razionalizzazione può cambiare il fatto che gli scienziati hanno costruito effettivamente la bomba nucleare, conoscendone fin dal principio il potere distruttivo e sapendo che sarebbe stata probabilmente utilizzata.

È però doveroso aggiungere che gli scienziati agirono sotto la pressione di una guerra terribile combattuta contro nemici spietati, avendo di fronte la prospettiva terrificante che un folle come Adolf Hitler potesse arrivare a costruire la bomba per primo. Si deve anche aggiungere che, in generale, gli scienziati che lavorarono alla bomba si sentirono profondamente a disagio per quello che facevano, che molti si opposero al suo uso, e che qualcuno addirittura abbandonò in seguito il campo della fisica nucleare, in preda a qualcosa che non può essere definito se non come senso di colpa.

Nel 1945 un gruppo di fisici, capeggiati dal premio Nobel James Frank (oggi cittadino americano), fecero una petizione al Ministero della guerra contro l'uso della bomba nucleare sulle città giapponesi, esponendo dettagliatamente quale sarebbe stata la pericolosa situazione di stallo che sarebbe seguita al suo uso. Assai minori furono gli scrupoli di coscienza dei capi politici e

militari che presero la decisione vera e propria di usare la bomba e che, per qualche strana ragione, sono considerati come patrioti da molti di coloro che vedono gli scienziati come demoni.

Inoltre, non possiamo e non dobbiamo sottovalutare il fatto che, liberando l'energia del nucleo atomico, gli scienziati ci hanno messo a disposizione un potenziale che può essere usato costruttivamente e non solo distruttivamente. È importante sottolineare questo punto in un mondo e in un'epoca in cui la minaccia della distruzione nucleare ha messo la scienza e gli scienziati in una delicata posizione difensiva, e in particolare in un paese come gli Stati Uniti tradizionalmente sensibile alla tesi di Rousseau secondo la quale l'istruzione sarebbe una fonte di corruzione della condizione integra e ingenua degli esseri umani nello stato di natura.

Perfino l'esplosione di una bomba atomica potrebbe non essere soltanto distruttiva. Come gli esplosivi chimici, di potenza minore, da tempo usati nella tecnica mineraria e nella costruzione di dighe e autostrade, anche gli esplosivi nucleari potrebbero apportare enormi vantaggi in progetti costruttivi. A questo proposito sono stati proposti sogni di tutti i generi: creare porti, scavare canali, frantumare formazioni rocciose del sottosuolo, apprestare riserve di calore per la produzione di energia - si è pensato di utilizzare l'energia nucleare perfino per la propulsione a grandi distanze delle navi spaziali. La prospettiva del pericolo di contaminazione radioattiva o di spese superiori al previsto o di entrambe le cose ha frenato questi ambiziosi progetti.

Eppure è stata realizzata un'applicazione costruttiva dell'energia nucleare, basata proprio sul tipo di reazione a catena nata sotto lo stadio dell'Università di Chicago. Un reattore nucleare controllato può sviluppare grandi quantità di calore, che, naturalmente, possono essere convogliate altrove da un "refrigerante", come l'acqua o anche un metallo fuso, per produrre elettricità o riscaldare un edificio.

NAVI A PROPULSIONE NUCLEARE.

Reattori nucleari sperimentali in grado di produrre elettricità furono costruiti in Gran Bretagna e negli Stati Uniti già nei primi anni dopo la guerra. Gli Stati Uniti oggi possiedono una flotta di più di 100 sottomarini nucleari, il primo dei quali, il "Nautilus" (costato 50 milioni di dollari), fu varato nel gennaio 1954. Questa unità, così importante a quell'epoca come lo era stato il "Clermont" di Fulton ai suoi tempi, era dotata di motori che potevano contare su una fonte virtualmente illimitata di energia; ciò permette ai sottomarini di restare sott'acqua per periodi indefinitamente lunghi, mentre i sottomarini ordinari devono tornare spesso in superficie per ricaricare le batterie mediante generatori diesel che richiedono aria per il loro funzionamento. Inoltre, mentre i sottomarini ordinari viaggiano a una velocità di otto nodi, un sottomarino nucleare viaggia a venti nodi e più.

Il primo nocciolo del reattore del "Nautilus" durò per 100 mila chilometri, durante i quali fu data una dimostrazione spettacolare. Il "Nautilus" attraversò l'Oceano Artico in immersione nel 1958, rilevando una profondità dell'oceano al polo nord pari a 4090 metri, assai più di quanto si era pensato. Un secondo sottomarino nucleare, più grande, il "Triton", circumnavigò il globo restando sempre in immersione, seguendo la rotta di Magellano, in ottantaquattro giorni, tra il febbraio e il maggio del 1960.

Anche l'Unione Sovietica possiede sottomarini nucleari e, nel dicembre del 1957, varò la prima nave nucleare di superficie, il rompighiaccio "Lenin". Poco prima gli Stati Uniti avevano messo in cantiere un'imbarcazione nucleare di superficie; e nel luglio del 1959 furono varati il "Long Beach" (un incrociatore) e il "Savannah" (una nave mercantile). Il "Long Beach" è azionato da due reattori nucleari.

Meno di dieci anni dopo il varo delle prime imbarcazioni nucleari, gli Stati Uniti avevano, tra quelle in servizio, in costruzione o in procinto di essere costruite, quattro imbarcazioni di superficie nucleari. Eppure, salvo che per i sottomarini, l'entusiasmo per la propulsione nucleare è

andato scemando. Nel 1967, il Savannah è stato posto in disarmo dopo due anni di vita; il suo costo di esercizio ammontava a 3 milioni di dollari all'anno, spesa che venne considerata eccessiva.

REATTORI NUCLEARI PER LA PRODUZIONE DI ELETTRICITÀ.

Ma non esistono soltanto gli scopi militari. Il primo reattore nucleare costruito per produrre energia elettrica destinata a usi civili è entrato in funzione nell'Unione Sovietica nel giugno del 1954; era piuttosto piccolo, con una potenza non superiore a 5000 kilowatt. Nell'ottobre del 1956, la Gran Bretagna mise in funzione la centrale di Calder Hall, con una potenza di più di 50 mila kilowatt.

Gli Stati Uniti arrivarono terzi in questo campo. Il 26 maggio 1958, la Westinghouse mise in funzione un piccolo reattore nucleare per la produzione di energia elettrica per usi civili a Shippingport, in Pennsylvania, con una potenza di 60 mila kilowatt. Altri reattori seguirono ben presto negli Stati Uniti e altrove.

Nel giro di poco più di dieci anni furono costruiti reattori nucleari in una dozzina di paesi, e quasi la metà dell'elettricità distribuita negli Stati Uniti per usi civili proveniva dalla fissione nucleare.

Anche lo spazio esterno fu conquistato: il 3 aprile 1965, fu lanciato un satellite azionato da un piccolo reattore. Eppure il problema della contaminazione radioattiva è assai serio. All'inizio degli anni settanta l'opposizione pubblica alla continua proliferazione delle centrali nucleari divenne sempre più forte.

Poi, il 28 marzo 1979, ci fu il più serio incidente nucleare della storia americana; avvenne a Three Mile Island, sul fiume Susquehanna, vicino a Harrisburg. In realtà non vi fu rilascio di quantità significative di radioattività e nessun pericolo per le persone, anche se per vari giorni si rasentò il panico. Il reattore fu comunque messo fuori esercizio a tempo indefinito, essendo molto lunghe e costose le operazioni di disinquinamento.

La vittima principale di questo incidente fu l'industria dell'energia nucleare: un'ondata di sentimenti antinucleari si rovesciò sugli Stati Uniti e anche su varie altre nazioni: la probabilità che vengano messi in funzione nuovi reattori nucleari negli Stati Uniti è diminuita drasticamente.

A quanto pare, l'incidente, oltre a far comprendere agli americani in modo drammatico cosa possa voler dire una contaminazione radioattiva, ha anche rafforzato l'opposizione della pubblica opinione mondiale contro la produzione (per non parlare dell'uso) di bombe nucleari, cosa certamente ottima agli occhi di qualsiasi essere ragionevole[2].

Eppure non si può rinunciare tanto facilmente all'energia nucleare nei suoi aspetti pacifici. Il fabbisogno umano di energia è soverchiante; come già ho messo in luce in questo stesso capitolo, è possibile che i combustibili fossili non ci bastino a lungo e non è probabile, almeno per un certo tempo, che riusciamo a sostituirli con l'energia solare.

L'energia nucleare, invece, è a portata di mano, e non mancano coloro che sostengono che, con le adeguate misure di sicurezza, essa "non" sia più pericolosa dei combustibili fossili, anzi lo sarebbe di meno. (Anche per quanto riguarda la contaminazione radioattiva, si deve ricordare che il carbone contiene piccole quantità di impurità radioattive e che bruciando esso immette nell'aria più radioattività dei reattori nucleari - almeno così si sostiene.)

REATTORI AUTOFERTILIZZANTI.

[2] A rinvigorire tale opposizione ha contribuito notevolmente il gravissimo incidente avvenuto alla fine di aprile del 1986 presso la centrale nucleare sovietica di Chernobyl. [N.d.R.]

Supponiamo allora di considerare la fissione nucleare come una fonte di energia. Quanto a lungo potremmo contare su di essa? Non molto a lungo, se dovessimo far conto esclusivamente sul poco abbondante uranio 235 fissionabile; per fortuna è possibile creare altri combustibili fissili, partendo dall'uranio 235.

Abbiamo visto che uno di questi combustibili creati dall'uomo è il plutonio. Supponiamo di costruire un piccolo reattore che utilizzi uranio arricchito come combustibile, omettendo il moderatore: avremo allora dei neutroni veloci che affluiranno in una «camicia» di uranio naturale posta tutt'intorno, convertendo l'uranio 238 in plutonio; se facciamo in modo che siano pochi i neutroni che vanno persi, da ogni fissione di un atomo di uranio 235 del nocciolo del reattore ricaveremo più di un atomo di plutonio. In altri termini, produrremo più combustibile di quello che consumiamo.

Il primo di questi reattori autofertilizzanti è stato costruito sotto la guida del fisico americano-canadese Walter Henry Zinn ad Arco, nell'Idaho, nel 1951. Fu chiamato E.B.R.-1 (Experimental Breeder Reactor-1). Oltre a dimostrare la realizzabilità del processo di autofertilizzazione, esso produceva elettricità. Fu messo fuori esercizio perché obsoleto nel 1964 (tanto veloce è il progresso in questo campo). L'autofertilizzazione può moltiplicare di molte volte l'energia che si può ricavare dall'uranio, perché fa dell'uranio 238, il più comune isotopo dell'uranio, un potenziale combustibile.

Un altro combustibile fissile potenziale è l'elemento torio, di cui esiste esclusivamente l'isotopo 232; l'assorbimento di neutroni veloci lo trasforma nell'isotopo artificiale torio 233, che decade in breve tempo diventando uranio 233, per la fissione del quale bastano neutroni lenti; esso è in grado di dar vita a una reazione a catena autosostenuta. Così, si può aggiungere il torio alle fonti di energia disponibili; il torio, inoltre, è cinque volte più abbondante dell'uranio sulla terra. È stato stimato che nelle prime centinaia di metri di profondità della crosta terrestre sono contenute in media 4200 tonnellate di uranio e torio per chilometro quadrato.

Naturalmente non tutto questo materiale è facilmente estraibile.

Nel complesso si può ritenere che la quantità totale di energia ricavabile dalle riserve di uranio e di torio sia circa venti volte quella ricavabile dal carbone e dal petrolio che ci rimangono.

Tuttavia, le preoccupazioni nutrite dalla gente a proposito dei reattori ordinari non possono che aggravarsi nel caso dei reattori autofertilizzanti. Il plutonio è molto più pericoloso dell'uranio, e alcuni sostengono che sia, tra i materiali che possono essere prodotti in grandi quantitativi, il più tossico in assoluto, e che se soltanto un po' di plutonio si diffondesse nell'ambiente provocherebbe una catastrofe irreversibile. Sussiste anche il timore che il plutonio destinato a reattori pacifici possa essere rubato o trafugato e usato per costruire una bomba nucleare (come ha già fatto l'India), che potrebbe poi essere usata per ricatti criminali.

Forse si tratta di timori esagerati, tuttavia pur sempre ragionevoli; inoltre gli incidenti e i furti non sono gli unici motivi di preoccupazione. Anche se non vi fosse tema alcuna di incidenti, i reattori nucleari resterebbero pericolosi. Per capire il perché, consideriamo la radioattività e la radiazione ad alta energia a cui essa dà origine.

I PERICOLI DELLA RADIAZIONE.

Certo, la vita sulla terra è stata sempre esposta alla radioattività naturale e ai raggi cosmici. Tuttavia, la produzione di raggi X in laboratorio e la concentrazione di sostanze naturalmente radioattive, come il radio, che ordinariamente esistono in tracce diluitissime nella crosta terrestre, hanno moltiplicato il pericolo. Alcuni dei primi ricercatori che lavorarono con i raggi X e con il radio ricevettero addirittura dosi letali: tanto Marie Curie che sua figlia Irène Joliot-Curie morirono di leucemia dovuta all'esposizione a tali raggi, e vi è poi il caso famoso degli operai che verniciavano i quadranti degli orologi negli anni venti, che morirono perché si passavano sulle labbra i pennelli sporchi di radio.

Il fatto che l'incidenza generale della leucemia sia aumentata sostanzialmente negli ultimi decenni può esser dovuto, in parte, all'aumentato uso dei raggi X destinati a varie applicazioni.

L'incidenza della leucemia tra i medici, che hanno parecchie occasioni di venir esposti ai raggi X, è doppia che nella popolazione in generale. Tra i radiologi, che sono specialisti che usano appunto i raggi X, l'incidenza è dieci volte maggiore. Non fa meraviglia che si sia cercato di sostituire i raggi X con altre tecniche, come quelle basate sugli ultrasuoni. L'avvento della fissione ha peggiorato le cose. Nelle bombe o nei reattori nucleari il processo di fissione libera radioattività su una scala che potrebbe rendere sempre più pericoloso per la vita umana tutto ciò che mangiamo, beviamo o respiriamo, nonché l'intera atmosfera e gli oceani. La fissione ha introdotto una forma di inquinamento il cui controllo metterà a dura prova l'ingegno umano.

I "prodotti della fissione" degli atomi di uranio o di plutonio assumono varie forme. Tra i frammenti si possono trovare isotopi di bario, di tecnezio o di vari altri elementi. In totale sono stati identificati all'incirca 200 differenti prodotti radioattivi della fissione, che sollevano molti problemi di tecnologia nucleare, perché alcuni di essi assorbono facilmente i neutroni smorzando la reazione.

Per questa ragione il combustibile di un reattore deve essere estratto e purificato a intervalli abbastanza frequenti.

Oltre a ciò, questi frammenti di fissione sono tutti pericolosi per la vita in vario grado, a seconda della natura e dell'energia della radiazione. Per esempio, l'introduzione nel corpo umano di particelle alfa è più pericolosa di quella di particelle beta. Anche la velocità di decadimento è importante: un nuclide che decade rapidamente bombarda chi vi è esposto con una maggiore quantità di radiazione al secondo o all'ora di un altro che decade lentamente.

Il tasso di decadimento di un nuclide radioattivo è qualcosa di cui si può parlare solo in presenza di un gran numero di suoi atomi. Un singolo nucleo può disintegrarsi in qualsiasi momento - nel prossimo istante o tra un miliardo di anni o in qualsiasi momento intermedio - e non è possibile prevedere quando lo farà. Ogni specie radioattiva, tuttavia, ha un tasso medio di decadimento; pertanto, se in un processo è implicato un grande numero di atomi, è possibile prevedere con grande precisione quale frazione del totale si disintegrerà nell'unità di tempo. Per esempio, supponiamo che l'esperienza dimostri che, in un dato campione di un atomo che chiameremo X, gli atomi decadono al tasso di 1 su 2 all'anno. Alla fine di un anno, su ogni 1000 atomi X del campione originario, 500 saranno rimasti atomi X; alla fine del secondo anno, 250; alla fine del terzo, 125, e così via.

Il tempo necessario perché decada la metà degli atomi originari è chiamato "tempo di dimezzamento" di quel dato atomo (un'espressione introdotta da Rutherford nel 1904); di conseguenza il tempo di dimezzamento dell'atomo X è un anno. Ogni nuclide radioattivo ha un proprio tempo di dimezzamento caratteristico, che non cambia mai in condizioni ordinarie. (Gli unici tipi di influenza esterna che possono modificarlo sono il bombardamento del nucleo con una particella o la temperatura estremamente alta presente all'interno di una stella - in altre parole, eventi violenti, capaci di attaccare il nucleo stesso.)

Il tempo di dimezzamento dell'uranio 238 è 4,5 miliardi di anni. Non è sorprendente, quindi, che esista ancora sulla terra dell'uranio 238, nonostante il decadimento degli atomi di tale elemento. Un semplice calcolo mostra che occorrerebbe un periodo più di sei volte maggiore del tempo di dimezzamento per ridurre un nuclide radioattivo all'1 per cento della sua quantità originaria. Perfino tra 30 miliardi di anni, ci sarà ancora un residuo di circa un chilogrammo di uranio per ogni tonnellata oggi esistente nella crosta terrestre.

Gli isotopi di un elemento, pur essendo praticamente identici dal punto di vista chimico, possono differire molto per le loro proprietà nucleari. L'uranio 235, per esempio, decade con velocità sei volte maggiore di quella dell'uranio 238; il suo tempo di dimezzamento è di soli 710 milioni di anni, dal che si può desumere che, in epoche molto remote del passato, l'uranio fosse molto più ricco di uranio 235 di quanto non sia oggi. Sei miliardi di anni orsono, per esempio, l'uranio 235 doveva costituire circa il 70 per cento dell'uranio naturale. Tuttavia l'umanità non si

trova di fronte agli ultimi sgoccioli di uranio 235; anche se avessimo scoperto la fissione un milione di anni più tardi, la terra avrebbe ancora avuto il 99,9 per cento dell'uranio 235 che ha oggi.

È evidente che qualsiasi nuclide con un tempo di dimezzamento inferiore ai 100 milioni di anni deve essersi ridotto fino a scomparire nel corso della lunga vita dell'universo; è per questo che oggi non possiamo trovare altro che tracce di plutonio. L'isotopo del plutonio di vita media più lunga, il plutonio 244, ha un tempo di dimezzamento di soli 70 milioni di anni.

L'uranio, il torio e altri elementi radioattivi di lunga vita media dispersi finemente nel suolo e nelle rocce producono piccole quantità di radiazione, che è sempre presente nell'aria intorno a noi. Noi stessi, esseri umani, siamo leggermente radioattivi, perché tutti i tessuti viventi contengono tracce di un isotopo del potassio relativamente raro e instabile (il potassio 40), il cui tempo di dimezzamento è di 1,3 miliardi di anni. (Disintegrandosi, il potassio 40 dà origine a una certa quantità di argo 40, il che probabilmente spiega il fatto che quest'ultimo è di gran lunga il più comune nuclide di gas inerte che esista sulla terra: il rapporto potassio-argo è stato usato per determinare l'età dei meteoriti.)

Anche un isotopo radioattivo del carbonio, il carbonio 14, avendo un tempo di dimezzamento di soli 5770 anni, normalmente non dovrebbe più trovarsi sulla terra; esso, però, si forma di continuo per l'impatto di particelle presenti nei raggi cosmici sugli atomi di azoto della nostra atmosfera. Perciò vi sono sempre tracce di carbonio 14, che vengono continuamente incorporate nell'anidride carbonica dell'atmosfera. Essendo presente nell'anidride carbonica, tale nuclide viene inglobato nei tessuti vegetali da cui passa in quelli animali, e anche nei nostri corpi.

Il carbonio 14, sempre presente nel corpo umano, ha una concentrazione molto minore del potassio 40; ma il carbonio 14, avendo un tempo di dimezzamento molto più breve, si disintegra con frequenza molto maggiore. Il numero totale di disintegrazioni del carbonio 14 può essere circa un sesto di quello delle disintegrazioni del potassio 40; ma una certa percentuale di carbonio 14 è contenuta nel nostro patrimonio genetico; tale percentuale, disintegrandosi, può provocare dei cambiamenti fondamentali nelle singole cellule - cambiamenti che invece non vengono prodotti dalla disintegrazione del potassio 40.

Per questa ragione si potrebbe sostenere che il carbonio 14 è l'atomo radioattivo più importante che si trovi naturalmente nel corpo umano; questa possibilità fu segnalata dal biochimico russo-americano Isaac Asimov già nel 1955.

I vari nuclidi radioattivi e le radiazioni energetiche che si presentano in natura (come i raggi cosmici e i raggi gamma) costituiscono la "radiazione naturale". L'esposizione costante alla radiazione naturale ha svolto probabilmente una parte nell'evoluzione, producendo mutazioni; essa potrebbe anche essere in parte responsabile del flagello del cancro. Ma gli organismi viventi hanno convissuto con essa per miliardi di anni. La radiazione nucleare è diventata un serio pericolo solo nella nostra epoca, prima quando abbiamo cominciato a fare esperimenti con il radio, poi con l'avvento della fissione e dei reattori nucleari.

All'epoca in cui ebbe inizio il Progetto Manhattan, i fisici avevano appreso da una dolorosa esperienza i pericoli della radiazione nucleare, così che sofisticate misure protettive circondarono le persone che lavoravano al progetto stesso. I prodotti «caldi» della fissione e altri materiali radioattivi erano sistemati dietro pareti schermanti di grande spessore e osservati solo attraverso vetri al piombo; vennero costruiti strumenti per manipolare i materiali mediante comandi a distanza; ognuno doveva avere sugli abiti una striscia di pellicola fotografica o altri sistemi di rilevamento per controllare l'esposizione accumulata. Vennero condotti esperimenti su vasta scala con animali per stimare la "massima esposizione tollerabile". (I mammiferi sono più sensibili di altre forme di vita alla radiazione; tra i mammiferi, però, gli esseri umani presentano una resistenza media.)

Nonostante tutto, avvennero degli incidenti, e alcuni fisici nucleari morirono di "malattie da radiazione", causate da dosi troppo massicce. I rischi, comunque, ci sono in qualsiasi professione,

anche quella più sicura: chi lavora nel campo dell'energia nucleare oggi non sta peggio degli altri, grazie alle maggiori conoscenze sui rischi e alle precauzioni intese a evitarli.

Tuttavia, in un mondo pieno di reattori nucleari, in cui i prodotti di fissione ammontassero a tonnellate o a migliaia di tonnellate, le cose sarebbero un po' diverse. Come si farebbe a smaltire tutto quel materiale letale?

Gran parte di esso ha una radioattività di breve durata, che svanisce fino a diventare innocua nel giro di qualche settimana o di qualche mese; è quindi possibile tenerlo immagazzinato durante quel breve periodo e poi gettarlo via. Più pericolosi sono i nuclidi che hanno tempi di dimezzamento compresi tra uno e trenta anni, cioè abbastanza brevi da produrre un'intensa radiazione, ma anche abbastanza lunghi da essere pericolosi per generazioni e generazioni. Un nuclide con un tempo di dimezzamento di trenta anni impiegherà due secoli per perdere il 99 per cento della sua attività.

UTILIZZO DEI PRODOTTI DI FISSIONE.

I prodotti di fissione trovano applicazioni molto utili. Come fonti di energia, possono alimentare piccole apparecchiature o strumenti. Le particelle emesse da un isotopo radioattivo vengono assorbite e la loro energia viene convertita in calore, utilizzato da termocoppie per produrre elettricità. Le batterie che producono elettricità a partire dai radioisotopi vengono indicate con la sigla SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary Power); esse vanno anche sotto il nome più altisonante di batterie atomiche. Possono pesare meno di due chili, generare fino a 60 watt e durare per anni. Le batterie atomiche sono state usate nei satelliti - nel "Transit 4A" e nel "Transit 4B", per esempio, messi in orbita dagli Stati Uniti nel 1961 e destinati a servire come sussidi per la navigazione.

L'isotopo più comunemente usato nelle batterie SNAP è lo stronzio 90, su cui torneremo tra poco a proposito di un'altra questione. Si usano anche alcuni isotopi del plutonio e del curio.

Gli astronauti discesi sulla luna hanno sistemato sulla sua superficie questo tipo di generatori nucleari, per alimentare gli apparecchi necessari per alcuni esperimenti lunari e un emettitore di segnali radio. Questi strumenti hanno continuato per anni a compiere il loro lavoro in modo irreprensibile.

I prodotti di fissione possono essere utilizzati anche in medicina (per esempio, nella cura del cancro), per uccidere batteri, per conservare gli alimenti e in molti settori industriali, compresa la preparazione di prodotti chimici. Per esempio, la Hercules Powder Company ha progettato un reattore di cui usare le radiazioni per produrre glicole etilenico, che serve come anticongelante.

Però, a conti fatti, tutti questi impieghi, e altri ancora immaginabili, non possono utilizzare più di una piccola frazione delle grandi quantità di prodotti di fissione che verranno scaricati dai reattori. Questo rappresenta un grave problema di carattere generale: si stima che per ogni 200 mila kilowatt di potenza elettrica ottenuta col nucleare vengano prodotti 0,7 chili di scorie di fissione al giorno. Cosa farne? Gli Stati Uniti hanno già sotterrato milioni di litri di liquidi radioattivi; e si stima che, nel 2000, più di due milioni di litri di liquidi radioattivi dovranno essere smaltiti ogni giorno! Stati Uniti e Gran Bretagna hanno affondato nel mare contenitori in cemento pieni di prodotti di fissione. Si è proposto di affondare le scorie radioattive negli abissi oceanici, di accumularle in saline fuori uso, di imprigionarle in vetro fuso e sotterrarle quando fossero solide. Resta però sempre l'apprensione che la radioattività possa sfuggire in un modo o nell'altro, contaminando il suolo o i mari. Un incubo particolarmente allarmante è la possibilità che una nave a propulsione nucleare possa naufragare e riversare i prodotti della fissione accumulati nell'oceano. L'affondamento del sottomarino nucleare americano "Thresher" nell'Atlantico settentrionale, avvenuto il 10 aprile 1963, diede corpo a queste paure, anche se nel caso specifico non ci fu, a quanto pare, contaminazione.

RICADUTA RADIOATTIVA.

Se è vero che l'inquinamento prodotto dall'uso pacifico dell'energia nucleare costituisce un pericolo potenziale, quanto meno esso verrà tenuto sotto controllo con ogni mezzo e con buone probabilità di successo. Vi è però un tipo di inquinamento che si è già diffuso in tutto il mondo e che potrebbe venir diffuso deliberatamente in una situazione di guerra: si tratta della ricaduta ("fallout") di materiale radioattivo in seguito all'esplosione di bombe atomiche.

La ricaduta è prodotta da tutte le bombe nucleari, anche da quelle sperimentali; il fallout viene trasportato ovunque dal vento, portato a terra dalla pioggia, così che è praticamente impossibile che una nazione qualsiasi faccia esplodere una bomba nucleare nell'atmosfera senza che le altre se ne accorgano. Nell'eventualità di una guerra nucleare, la ricaduta radioattiva nel lungo periodo potrebbe produrre più vittime e più danni alla biosfera che lo scoppio stesso delle bombe nei paesi direttamente attaccati.

Vi sono tre tipi di ricaduta: "locale", "troposferica" e "stratosferica". La ricaduta locale è provocata dalle esplosioni a terra: gli isotopi radioattivi vengono adsorbiti sulle particelle del suolo e si depositano rapidamente entro un raggio di 150 chilometri dal luogo dell'esplosione. Quando esplodono nell'aria bombe nucleari a fissione dell'ordine del chilotone, i prodotti della fissione vanno a finire nella troposfera, e si depositano nel giro di un mese, dopo esser stati trasportati dai venti verso est per qualche migliaio di chilometri.

L'enorme emissione di prodotti di fissione da parte della prima superbomba, fatta esplodere nel Pacifico il primo marzo 1954, colse gli scienziati di sorpresa. Non si aspettavano che il fallout di una bomba a fusione fosse tanto «sporco». Restò gravemente contaminata una superficie vasta quanto il Massachussets (o il Veneto), circa 18 mila chilometri quadrati. Gli scienziati ne compresero però la ragione quando vennero a sapere che intorno al nocciolo di fusione vi era un mantello di U 238, in cui i neutroni avevano indotto la fissione; esso, infatti, oltre a moltiplicare la potenza dell'esplosione, aveva dato origine a una nube di prodotti di fissione molto più vasta di quella provocata da una semplice bomba a fissione del tipo usato a Hiroshima.

La ricaduta radioattiva prodotta dai test nucleari effettuati fino a oggi ha accresciuto solo di poco la radioattività naturale terrestre; tuttavia, anche un piccolo aumento rispetto al livello naturale può far salire l'incidenza del cancro, causare danni genetici e accorciare, anche se di poco, la vita media. Le stime più prudenti dei rischi sono concordi nell'affermare che, aumentando il tasso di mutazione, la ricaduta radioattiva prepara una buona dose di guai per le generazioni future.

Uno dei prodotti di fissione è particolarmente pericoloso per la vita umana: si tratta dello stronzio 90 (tempo di dimezzamento 28 anni), l'isotopo tanto utile per le batterie atomiche. Lo stronzio 90 che cade sul terreno o nelle acque viene assorbito dalle piante e quindi introdotto nei corpi di quegli animali (tra cui l'uomo) che si nutrono, direttamente o indirettamente, di vegetali. Esso è particolarmente pericoloso perché, essendo molto simile chimicamente al calcio, va a finire nelle ossa, dove si insedia per lungo tempo. I componenti delle ossa hanno un ricambio lento, cioè non vengono sostituiti con la stessa frequenza delle sostanze presenti nei tessuti molli; per tale ragione lo stronzio 90, una volta assorbito, può restare nel corpo di un individuo per gran parte della sua vita.

Lo stronzio 90 è entrato a far parte del nostro ambiente molto di recente; non ne esisteva sulla terra in quantità misurabile fino a quando gli scienziati non provocarono la fissione dell'uranio. Oggi però, in meno di una generazione, un po' di stronzio 90 è già insediato nelle ossa di qualsiasi essere umano, nonché in quelle di tutti i vertebrati. Considerevoli quantità di stronzio 90 fluttuano tuttora nella stratosfera, e aumenteranno, presto o tardi, la sua concentrazione nelle nostre ossa.

Tale concentrazione si misura in "unità di stronzio" (U.S.), una delle quali equivale a 1 picocurie di stronzio 90 per grammo di calcio nel corpo. Il "curie" è un'unità di radiazione (naturalmente il nome è in onore dei Curie), che in origine veniva ritenuta equivalente alla

radiazione prodotta da 1 grammo di radio in equilibrio con il rado, un prodotto della sua disintegrazione; oggi, però, viene considerata, in modo più generale, pari a 37 miliardi di disintegrazioni al secondo. Un picocurie è 1 trilionesimo di curie, ovvero 2,22 disintegrazioni al minuto. Un'unità di stronzio significa quindi 2,22 disintegrazioni al minuto per grammo di calcio presente nel corpo.

La concentrazione di stronzio 90 nello scheletro umano varia molto da luogo a luogo e da individuo a individuo; si sono trovate persone che ne hanno fino a settantacinque volte la quantità media; i bambini hanno in media una concentrazione almeno quadrupla di quella degli adulti, a causa del più rapido ricambio di sostanze nelle ossa durante la crescita. Anche le stesse stime della media variano, perché sono basate soprattutto su stime delle quantità di stronzio 90 presenti nella dieta. (Tra l'altro, il latte, da questo punto di vista, non è un alimento particolarmente pericoloso; infatti al calcio ingerito con gli ortaggi è associata una dose maggiore di stronzio 90: il "sistema di filtraggio" delle mucche elimina parte dello stronzio da esse assunto nutrendosi di foraggi vegetali.) Le stime della concentrazione media di stronzio 90 presente nelle ossa della popolazione americana nel 1959, prima che fossero bandite le esplosioni nucleari nell'atmosfera, andavano da meno di un'unità di stronzio a molto più di cinque. (Il "massimo tollerabile" è stato stabilito, dalla Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni, nella misura di 67 U.S.) Le medie, comunque, dicono ben poco, soprattutto perché lo stronzio 90 può raccogliersi in "punti caldi" nelle ossa e raggiungere un livello sufficientemente alto per far insorgere la leucemia o il cancro.

L'importanza degli effetti della radiazione ha avuto come conseguenza, tra l'altro, l'adozione di numerose unità diverse per misurarli. Una di tali unità, il "röntgen", che prende il nome dallo scopritore dei raggi X, si basa sul numero di ioni prodotti dai raggi X o gamma in questione. Più di recente è stato introdotto il "rad", che equivale all'assorbimento di 100 erg di radiazione di qualsiasi tipo per grammo.

Anche la natura della radiazione è importante: un rad di particelle di grande massa induce maggiori cambiamenti chimici nei tessuti rispetto a un rad di particelle leggere; pertanto una data energia sotto forma di particelle alfa è più dannosa della stessa energia sotto forma di elettroni.

Da un punto di vista chimico il danno da radiazione è causato soprattutto dalla scissione delle molecole di acqua (che costituiscono la maggior parte della massa dei tessuti viventi) in frammenti altamente attivi ("radicali liberi") che a loro volta reagiscono con le complicate molecole dei tessuti. Il danno inferto al midollo osseo, implicato nella produzione delle cellule del sangue, è una forma molto grave di patologia dovuta alla radiazione, che, in uno stadio avanzato, è irreversibile e può condurre alla morte.

Molti eminenti scienziati ritengono fermamente che il fallout dei test nucleari costituisca un grave pericolo per la razza umana. Il chimico americano Linus Pauling ha sostenuto che la ricaduta di una sola superbomba potrebbe provocare 100 mila decessi per leucemia e altre malattie nel mondo, e ha messo in rilievo il fatto che il carbonio 14, radioattivo, prodotto dai neutroni liberati in un'esplosione nucleare, rappresenta un serio pericolo genetico. Per tali ragioni Pauling ha svolto un'energica azione a favore della cessazione degli esperimenti con bombe nucleari, sostenendo tutti i movimenti intesi a far diminuire il pericolo di una guerra e a promuovere il disarmo. Altri scienziati, invece, tra cui il fisico ungherese-americano Edward Teller, hanno minimizzato l'entità del rischio rappresentato dal fallout. La simpatia del mondo in genere va a Pauling, come forse indica il fatto che gli è stato assegnato il premio Nobel per la pace nel 1963.

Nell'autunno del 1958 gli Stati Uniti, l'Unione Sovietica e la Gran Bretagna sospesero gli esperimenti nucleari in base a un accordo sulla fiducia (il che non ha impedito alla Francia di far esplodere la sua prima bomba nucleare nell'atmosfera nella primavera del 1960). Per tre anni la situazione parve rosea: la concentrazione di stronzio 90, dopo aver raggiunto un massimo, intorno al 1960 si stabilizzò su un valore ben al di sotto di quello stimato come il massimo compatibile con la sicurezza. Nondimeno circa 25 milioni di curie di stronzio 90 e di cesio 137 (un altro pericoloso prodotto di fissione) erano stati immessi nell'atmosfera durante i tredici anni di test nucleari, nei

quali si erano fatte esplodere non meno di 150 bombe di tutte le varietà. Solo due di queste sono state fatte esplodere in una situazione di conflitto, ma gli effetti sono stati davvero atroci. Nel 1961, senza preavviso, l'Unione Sovietica pose termine alla moratoria e riprese i test nucleari. Poiché l'URSS aveva fatto esplodere bombe termonucleari di potenza senza precedenti, gli Stati Uniti a loro volta si sentirono in obbligo di riprendere i test. L'opinione pubblica mondiale, risvegliata dall'interruzione della moratoria, reagì con grande indignazione.

Pertanto il 10 ottobre 1963 le tre maggiori potenze nucleari firmarono un trattato che bandiva parzialmente i test nucleari ("non più" un semplice accordo sulla fiducia): venivano bandite le esplosioni di bombe nucleari nell'atmosfera, nello spazio e sott'acqua. Erano permesse solo le esplosioni sotterranee, perché esse non producono ricaduta radioattiva. Questa è stata la mossa nella direzione della sopravvivenza umana che maggiormente ha indotto alla speranza, dall'inizio dell'Era Nucleare a oggi.

FUSIONE NUCLEARE CONTROLLATA.

Da più di trent'anni i fisici nucleari nutrono un sogno segreto ancora più affascinante di quello di volgere a fini costruttivi la fissione nucleare: il sogno di padroneggiare l'energia ottenuta dalla fusione nucleare. La fusione, dopo tutto, è il motore che fa andare il nostro mondo: le reazioni di fusione nel sole sono la fonte basilare di tutte le nostre forme di energia e della vita stessa. Se riuscissimo in qualche modo a riprodurre e a controllare tali reazioni sulla terra, avremmo risolto tutti i nostri problemi energetici. La nostra riserva di combustibile sarebbe grande quanto l'oceano, perché il combustibile sarebbe l'idrogeno.

Cosa strana, non sarebbe la prima volta che l'idrogeno verrebbe usato come combustibile. Poco tempo dopo la scoperta dell'idrogeno e lo studio delle sue proprietà, esso si era guadagnato un posto come combustibile chimico. Lo scienziato americano Robert Hare nel 1801 aveva ideato un cannello ossidrico, e in seguito le elevate temperature della combustione dell'idrogeno in atmosfera di ossigeno hanno avuto parecchi impieghi industriali.

L'idrogeno liquido, poi, ha avuto un'importanza straordinaria come combustibile per i razzi; si è anche proposto di usare l'idrogeno come combustibile particolarmente pulito per produrre elettricità e azionare automobili e veicoli in generale. (In questi ultimi casi, però, resta il problema della facilità con cui l'idrogeno esplode a contatto con l'aria.) Comunque, è come combustibile per la fusione nucleare che l'idrogeno apre oggi le prospettive più allettanti.

L'energia prodotta con la fusione nucleare sarebbe immensamente più conveniente di quella prodotta dalla fissione. Con uguale peso di combustibile, un reattore a fusione produrrebbe da cinque a dieci volte l'energia prodotta da un reattore a fissione. Un chilogrammo di idrogeno può produrre per fusione 77 milioni di kilowattora di energia; inoltre la fusione si baserebbe su isotopi dell'idrogeno facilmente ricavabili dal mare in grandi quantità, mentre per la fissione occorre estrarre i minerali di uranio e di torio - compito molto più difficile. E ancora: la fusione produce, per esempio, neutroni e idrogeno 3, che non sono - così si prevede - tanto difficili da controllare quanto i prodotti della fissione. Infine - e forse più importante di tutto - una reazione di fusione, in caso di una qualsiasi difficoltà, si limiterebbe a spegnersi, mentre una reazione di fissione può sfuggire al controllo ("escursione nucleare"), producendo un "meltdown" dell'uranio (anche se la cosa non è mai successa), che diffonderebbe la radioattività in modo molto pericoloso.

Se la fusione nucleare controllata fosse resa realizzabile, essa fornirebbe dunque - considerate la disponibilità del combustibile e l'abbondanza dell'energia prodotta - una riserva di energia che potrebbe bastare per miliardi di anni - tanto quanto durerà la terra.

L'unica conseguenza indesiderabile sarebbe allora l'"inquinamento termico" - l'energia prodotta dalla fusione si andrebbe ad aggiungere al calore totale che arriva sulla superficie della terra. Tale aumento potrebbe far salire, anche di poco, la temperatura, con risultati analoghi a quelli dell'effetto serra. Ciò vale anche per l'energia solare ottenuta da qualsiasi fonte diversa dalla

radiazione solare che raggiunge la terra in modo naturale. Per esempio, se si installassero nello spazio delle centrali a energia solare, si aumenterebbe la quantità di calore che arriva alla superficie della terra. In entrambi i casi, l'umanità dovrebbe o limitare il proprio uso dell'energia o trovare il modo di rinviare nello spazio parte del calore a un ritmo più sostenuto di quanto non avvenga naturalmente.

Tutto ciò, comunque, ha un interesse teorico solo se si riuscirà a produrre la fusione nucleare controllata prima in laboratorio e poi in un processo realizzabile su scala commerciale. Dopo una generazione di lavoro, non abbiamo ancora raggiunto questo stadio.

Dei tre isotopi dell'idrogeno, l'idrogeno 1 è il più comune, ma anche il più difficile da usare ai fini della fusione. Esso è il combustibile del sole, ma il sole può contare sulla sua massa enorme, su un intensissimo campo gravitazionale che lo tiene insieme e su temperature centrali di molti milioni di gradi. Solo in una minuscola percentuale dell'idrogeno presente nel sole avviene, in ogni dato istante, il processo della fusione nucleare; ma, data l'enorme massa presente, anche quella piccola percentuale è sufficiente.

L'idrogeno 3 è il più idoneo per la fusione, ma esiste in quantità così piccole e richiede un tale dispendio di energia per essere prodotto che non è assolutamente il caso, per ora, di considerarlo un combustibile utilizzabile da solo.

Resta l'idrogeno 2, che è più facile da manipolare dell'idrogeno 1 e molto più comune dell'idrogeno 3. Nell'idrogeno di tutto il mondo, solo 1 atomo ogni 6000 è di deuterio; ma tanto basta. Vi sono 35 trilioni di tonnellate di deuterio nell'oceano, abbastanza per rifornire ampiamente di energia l'umanità per tutto il futuro prevedibile.

Vi sono, però, dei problemi; la cosa può sorprendere, dato che le bombe basate sulla fusione esistono. Se siamo capaci di ottenere la fusione dell'idrogeno, perché non possiamo costruire un reattore, come costruiamo una bomba? È presto spiegato: per realizzare una bomba a fusione, ci occorre un innesco costituito da una bomba a fissione, e poi bisogna far esplodere il tutto. Per fare un reattore a fusione, ci occorre ovviamente un innesco meno drastico, e in seguito dobbiamo mantenere la reazione a un livello costante, controllato, non esplosivo.

Il primo problema è quello meno difficile: correnti ad alta intensità, onde sonore ad alta energia, raggi laser e così via, sono tutti in grado di produrre temperature dell'ordine dei milioni di gradi in tempi brevi. Non c'è dubbio che la temperatura necessaria possa essere facilmente raggiunta.

Ben altro problema è mantenere la temperatura voluta, riuscendo insieme a confinare l'idrogeno in fusione (almeno così si spera).

Ovviamente nessun contenitore materiale potrebbe confinare un gas a una temperatura di oltre 100 milioni di gradi. O il contenitore vaporizzerebbe o il gas si raffredderebbe. Il primo passo verso una soluzione sta nel ridurre la densità del gas assai al di sotto della pressione normale, riducendo così il contenuto di calore, ma mantenendo alta l'energia delle particelle. Il secondo passo è un'idea veramente geniale: in un gas a una temperatura molto alta gli atomi hanno perso tutti i loro elettroni, ed esso è ormai un "plasma" (termine introdotto da Irving Langmuir all'inizio degli anni trenta), fatto di elettroni e di nuclei nudi. Dato che esso è costituito solo di particelle cariche, perché non usare, per confinarlo, un intenso campo magnetico al posto di un contenitore materiale? Il fatto che i campi magnetici potessero obbligare le particelle cariche a restar confinate entro un fascio era noto già dal 1907 e l'effetto veniva chiamato reostrizione ("pinch effect"). L'idea della "bottiglia magnetica" venne messa alla prova e risultò che funzionava - ma solo per un tempo brevissimo. I fili di plasma confinati nella bottiglia si contorcevano immediatamente come serpenti, si spezzavano e si estinguevano.

Un altro approccio consiste nel fare in modo che il campo magnetico sia più intenso agli estremi del tubo, in modo da «intrappolare» il plasma. Anche questo espediente si è dimostrato non del tutto soddisfacente. Se si riuscisse a tener confinato il plasma a 100 milioni di gradi anche per un solo secondo, la reazione di fusione verrebbe innescata e si potrebbe ricavare energia dal

sistema; tale energia potrebbe essere usata per rendere più stabile e più potente il campo magnetico e per mantenere la temperatura al livello appropriato.

La reazione di fusione allora sarebbe autosostenuta e verrebbe controllata dalla stessa energia da essa prodotta. Ma impedire la fuga del plasma anche per quel breve secondo è più di quanto oggi riusciamo a fare.

Dato che la fuga di plasma avviene con particolare facilità all'estremità del tubo, si è pensato di abolire le estremità, dando al tubo una forma a ciambella (toro). Una configurazione particolarmente vantaggiosa è quella a otto, progettata per la prima volta nel 1951 da Spitzer e chiamata "stellarator". Un sistema ancora più promettente è stato ideato dal fisico sovietico Lev Andreevic' Artsimovic': si chiama Camera Magnetica Toroidale, abbreviato in Tokamak.

Anche i fisici americani stanno lavorando sui Tokamak, e inoltre con un apparecchio chiamato Scyllac, progettato per confinare gas aventi densità maggiori, allo scopo di ridurre il tempo di confinamento.

Per circa venti anni i fisici hanno progredito a piccoli passi verso la meta costituita dalla fusione: i progressi sono stati lenti, ma per ora nulla fa pensare che si sia giunti a un punto morto.

Nel frattempo la ricerca sulla fusione ha già portato delle applicazioni concrete: la "torcia a plasma", assolutamente silenziosa e capace di emettere getti che raggiungono i 50 mila gradi C, è di gran lunga superiore ai cannelli chimici; è stato suggerito che essa potrebbe fornire la soluzione definitiva al problema dei rifiuti: nella sua fiamma tutto - proprio "tutto" - verrebbe ridotto agli elementi costitutivi, e tutti gli elementi sarebbero pronti per essere riciclati e convertiti nuovamente in materiali utili.

BIBLIOGRAFIA.

Al lettore italiano che volesse approfondire gli argomenti trattati nel presente volume segnaliamo le seguenti opere:

In generale:

I. Asimov, "Catastrofi a scelta", Mondadori, Milano 1980.

- "Esplorando la terra e il cosmo", Mondadori, Milano 1983.

1.

AA.VV., "Storia delle scienze" (diretta da E. Agazzi), Città Nuova Ed., Roma 1984.

J. D. Bernal, "Storia della scienza", 2 volumi, Editori Riuniti, Roma 1956.

A. C. Crombie, "Da Agostino a Galileo", Feltrinelli, Milano 1970.

J. L. E. Dreyer, "Storia dell'astronomia da Talete a Keplero", Feltrinelli, Milano 1970.

A. R. Hau, "La rivoluzione scientifica 1500-1800", Feltrinelli, Milano 1976; nuova versione: "La rivoluzione nella scienza 1500-1750", Feltrinelli, Milano 1986.

E. Nagel, "La struttura della scienza", Feltrinelli, Milano 1968.

2.

I. Asimov, "Il collasso dell'universo", Mondadori, Milano 1978.

Enciclopedie Cambridge, "Astronomia", Laterza, Bari 1981.

Abetti-Hack, "Le nebulose e gli universi-isole", Boringhieri, Torino 1968.

M. Bondi, "Sguardi sull'universo", Zanichelli, Bologna 1964.

W. Bonnor, "Universo in espansione", Boringhieri, Torino 1967.

G. Ganow, "La creazione dell'universo", Mondadori, Milano 1956.

L. Gratton, "Relatività Cosmologia Astrofisica", Boringhieri, Torino 1968.

-, "Introduzione all'astrofisica", 2 volumi, Zanichelli, Bologna 1978.

M. Hack, "L'universo", Feltrinelli, Milano 1967.
F. Hoyle, "Galassie, nuclei e quasar", Einaudi, Torino 1970.
A. Koyré, "Dal mondo chiuso all'universo infinito", Feltrinelli, Milano 1970.
P. Maffei, "Al di là della luna", Mondadori, Milano 1973.
- "I mostri del cielo", Mondadori, Milano 1976.
- "L'universo nel tempo", Milano, Mondadori 1982.
D. Sciama, "Cosmologia moderna", Mondadori, Milano 1973.
R. e M. Sexl, "Nane bianche e buchi neri", Boringhieri Torino 1981.
M. Shapley, "Le stelle e l'uomo", Mondadori, Milano 1961.
M. L. Shipman, "Buchi neri, quasar e universo", Zanichelli, Bologna 1981.
R. M. Wald, "Teoria del Big Bang e buchi neri", Boringhieri, Torino 1980.
G. S. Weinberg, "I primi tre minuti", Mondadori, Milano 1977.

3.
G. Abetti, "Le stelle e i pianeti", Boringhieri, Torino, 1963.
P. Francis, "I pianeti", Boringhieri, Torino 1985.
G. Ohring, "Le atmosfere dei pianeti", Zanichelli, Bologna 1968.
K. Gatland (a cura di), "L'esplorazione dello spazio", De Agostini, Novara 1983.

4.
I. Asimov, "Esplorando la terra e il cosmo", Mondadori, Milano 1983.
Bolt, "I terremoti", Zanichelli, Bologna 1982.
P. Cattermole - P. Moore, "Storia della terra", Laterza, Bari 1985.
R. e B. Decker, "I vulcani", Zanichelli, Bologna 1984.
Enciclopedie Cambridge, "Scienze della terra", Laterza, Bari 1982.
N. Morello, "La macchina della terra. Teorie geologiche dal Seicento all'Ottocento", Loescher Torino 1979.
P. Rossi, "I segni del tempo", Feltrinelli, Milano 1979.
Takeuchi - Uyeda - Kanamori, "La deriva dei continenti", Boringhieri, Torino 1970.
H. Tazieff, "Vulcani e tettonica", Zanichelli, Bologna 1976.
A. Wegener, "La formazione dei continenti e degli oceani", Boringhieri, Torino 1976.
D. York. "Il pianeta terra", Boringhieri, Torino 1979.

5.
L. Battan, "Le nubi", Zanichelli, Bologna 1964.
-, "Il radar esplora l'atmosfera", Zanichelli, Bologna 1965.
-, "Violenze dell'atmosfera", Zanichelli, Bologna 1967.
R. A. Craig, "Alla soglia dello spazio", Zanichelli, Bologna 1977.
M. Pinna, "L 'atmosfera e il clima", Utet, Torino 1978.
E. R. Reiter, "Le correnti a getto", Zanichelli. Bologna 1969.

6.
I. Asimov, "Breve storia della chimica", Zanichelli, Bologna 1968.
C. A. Couison, "La valenza", Zanichelli, Bologna 1975.
A. Holden - P. Singer, "La struttura dei cristalli", Zanichelli, Bologna 1969.
D. Macdonald, "Verso lo zero assoluto", Zanichelli, Bologna 1965.
Open University, "Introduzione ai materiali", Mondadori, Milano 1976.
L. Pauling, "La natura del legame chimico", Edizioni Italiane, Roma 1961.
J. I. Solovev, "L'evoluzione del pensiero chimico dal '600 ai giorni nostri", Mondadori, Milano 1976.

7.
M. Born, "Fisica atomica", Boringhieri, Torino 1976.
B. Cohen, "Il cuore dell'atomo", Zanichelli, Bologna 1968.
M. Fritzsch, "Quark", Boringhieri, Torino 1983.
G. Ganow, "Trent'anni che sconvolsero la fisica", Zanichelli, Bologna 1966.
F. Soddy, "La storia dell'energia atomica", Boringhieri, Torino 1951.
S. Weinberg, "La scoperta delle particelle subatomiche", Zanichelli, Bologna 1986.
-, "Teorie unificate dell'interazione tra particelle elementari", in «Le scienze», novembre 1974, pagine 28-37.
R. R. Wilson, "Acceleratori di particelle", Zanichelli, Bologna 1964.
C. N. Yang, "La scoperta delle particelle elementari", Boringhieri, Torino 1964.

8.
E. Bellone, "Le leggi della termodinamica da Boyle a Boltzmann",
Loescher, Torino 1978.
M. Born, "La sintesi einsteiniana", Boringhieri, Torino 1973.
C. Durell, "La relatività con le quattro operazioni", Boringhieri, Torino 1967.
A. Einstein - L. Infeld, "L'evoluzione della fisica", Boringhieri, Torino 1965.
W. Kock, "Onde sonore e onde luminose", Zanichelli, Bologna 1967.
M. Pagels, "Il codice cosmico", Boringhieri, Torino 1984.
A. Prat Bastai, "Calore, materia e moto", Zanichelli, Bologna 1981.
V. Ronchi, "Storia della luce da Euclide a Einstein", Laterza, Bari 1983.
J. M. Rush, «La velocità della luce», in "Fisica e Cosmo", Zanichelli, Bologna 1969.
D. Sciama. "La relatività generale", Zanichelli, Bologna 1972.

9.
A. M. W. Beck, "Parole e onde", Il Saggiatore, Milano.
M. Brotherton, "Laser e maser", Etas Kompass, Milano 1969.
T. Derry - T. Williams, "Storia della tecnologia", Boringhieri, Torino 1977.
J. Pierce, "Elettronica quantica", Zanichelli, Bologna 1968.
-, "Onde e messaggi", Bologna, Zanichelli 1969.
Singer - Solymard - Rupert Hail - Williams (a cura di), "Storia della tecnologia", 5 volumi, Boringhieri, Torino 1961-65.
W. Smith - P. Sorokin. "Il laser", Boringhieri, Torino 1974.

10.
AA.VV. "Chi ha paura del sole?", Mazzotta, Milano 1976.
B. Bertotti - F . Calogero, "Le armi nucleari", in «Giornale di fisica», n. 3, 1973.
S. Groueff, "Progetto Manhattan", Mondadori, Milano 1968.
Gruppo d'Orsay, "I pericoli del nucleare", Clup-Clued, Milano.
E. Nardelli, "I combustibili fossili", Etas Kompass, Milano 1980.
J. R. Oppenheimer, "Scienza e pensiero comune", Boringhieri, Torino 1965.
A. Prat Bastai, "Il problema dell'energia. 2: Fissione nucleare/Fusione nucleare", Zanichelli, Bologna 1984.
E. Segrè, "Enrico Fermi, fisico", Zanichelli, Bologna 1971.
R. Wilson - R. Littaver, "Acceleratori di particelle", Zanichelli, Bologna 1964.